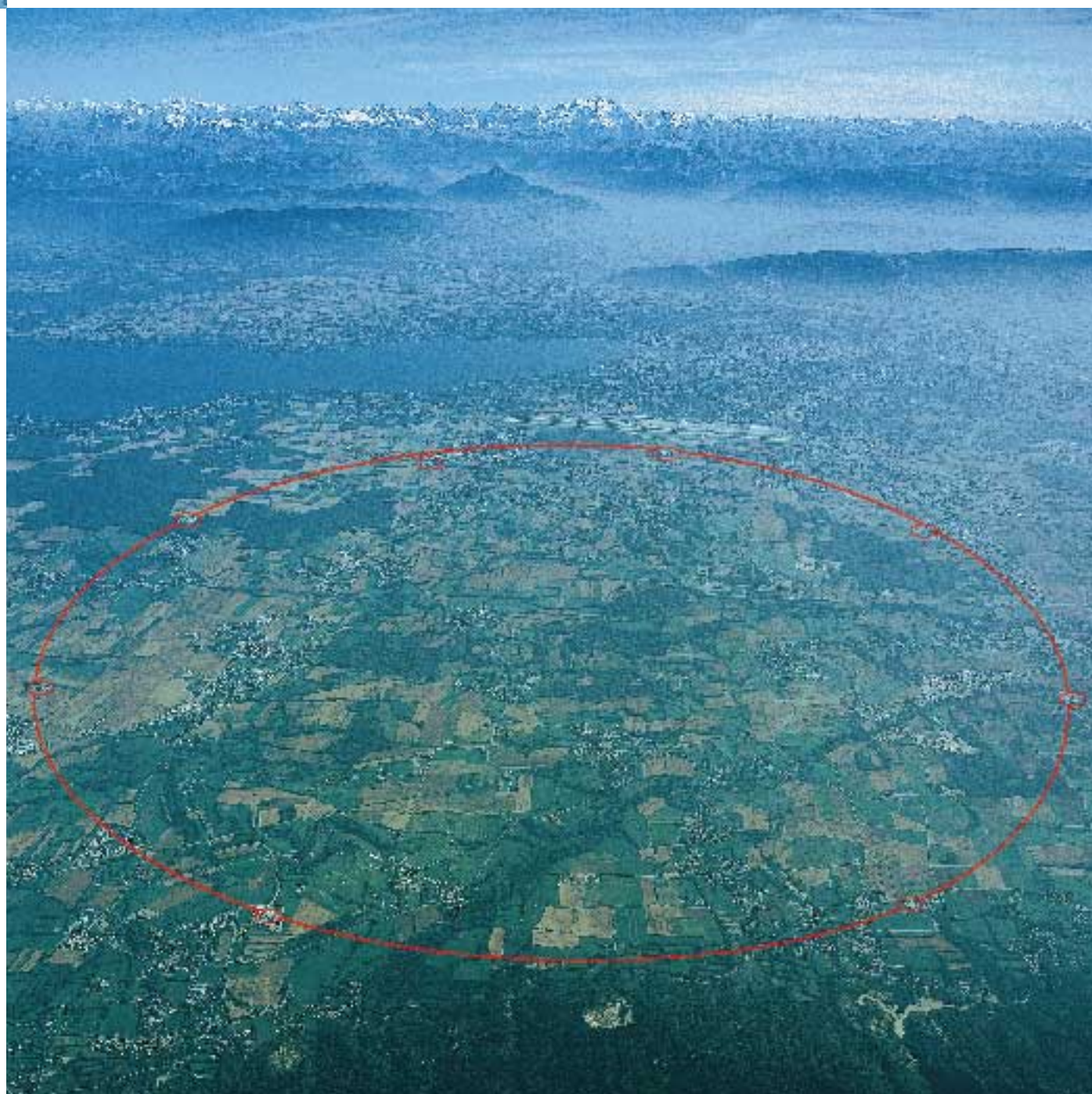




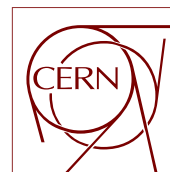
LHC



*étude d'impact
sur l'environnement*

Projet LHC :

Etude d'impact
sur
l'environnement



Projet LHC:

Etude d'impact
sur
l'environnement

ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

CH - 1211 GENÈVE 23 , SUISSE

Date de publication : mars 1997.

Ce rapport a été édité par AC-DI à partir de contributions extérieures et d'informations fournies par différents groupes du CERN.

Responsable de la publication :	C. H. Llewellyn Smith Directeur général du CERN
Editeur :	M. Buhler-Broglin
Auteurs :	J.-L. Baldy, M. Buhler-Broglin, B. Carchia, G. Drouet, J.-M. Dufour, J. de Groot, M. Höfert, G. Kantardjian, P. Lefèvre, A. Perrot, K. Potter, E. Radermacher, P. Troendle
Comité de rédaction :	M. Buhler-Broglin, B. Carchia, G. Drouet, G. V. Frigo, G. Hentsch, P. Lefèvre
Préparation de copie :	B. Carchia
Dessins :	M. Berbiers, M. Goidadin
Conception typographique :	G. V. Frigo

Le texte et les images ont été produits sur Apple® Macintosh™ avec *FrameMaker™*, *Illustrator™*, *PhotoShop™* et *Dimensions™*.
Caractères : *Goudy Old Style Italic*, *ITC Stone Sans*, *ITC Stone Serif*.

Imprimé au CERN sur papier recyclé 252 Biberist Renato
issu à 100% de rebuts papetiers.

Copyright® CERN 1997

ISBN 92-9083-100-6

*Poursuivant l'effort européen
entrepris depuis plus de quarante ans
dans le domaine de la physique des particules,
le CERN se propose de construire
un grand accélérateur collisionneur de protons,
le LHC
(Large Hadron Collider).*

Ce projet fait l'objet de la présente étude d'impact.

L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) est un laboratoire intergouvernemental.

Actuellement, 19 Etats européens en sont membres : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, le Royaume-Uni, la République Slovaque, la Suède, la Suisse et la République Tchèque. La Commission des Communautés européennes, Israël, le Japon, la Turquie, la Fédération de Russie et l'UNESCO ont, quant à eux, le statut d'observateurs.

L'acronyme CERN désignait le "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire", créé par l'Accord de Genève du 15 février 1952. Il a été conservé par commodité et par habitude pour désigner l'Organisation, bien que la dénomination "Laboratoire européen pour la Physique des Particules" corresponde mieux à ses activités. L'acte créateur du CERN est la Convention signée à Paris le 1er juillet 1953, entrée en vigueur le 24 septembre 1954 et révisée le 17 janvier 1971.

L'Organisation est financée par les contributions de ses Etats membres. Son budget est de 924 millions de francs suisses en 1996. Son siège est à Genève. Un accord définissant le statut du CERN en territoire français a été signé le 13 septembre 1965 et révisé le 16 juin 1972. Le second accord reconnaît au CERN le plein statut d'organisation internationale en France. L'Annexe technique n° 1, "Statut juridique du CERN et responsabilité en cas de dommages", donne plus de détails sur le statut juridique du CERN.



Le Conseil du CERN a décidé à l'unanimité, le 16 décembre 1994, de construire le grand collisionneur de hadrons (LHC), qui donne aux physiciens des particules européens et du monde un instrument exceptionnel pour la poursuite de leurs travaux.

Cet instrument sera réalisé sur le domaine que la Suisse et la France, Etats-hôtes de l'Organisation, ont mis à la disposition de celle-ci.

Comme il l'a fait pour ses grands accélérateurs antérieurs, en particulier le SPS et le LEP, le CERN réalisera le LHC en concertation avec les autorités nationales et les élus locaux.

Hubert Curien

Président du Conseil du CERN
lors de l'approbation du projet LHC
Ancien Ministre de la Recherche
du Gouvernement français



Depuis sa création en 1954, le CERN s'est forgé une place au premier rang mondial de la physique des particules. Des découvertes fondamentales y ont été faites telle que celle des courants neutres, première preuve de l'unification des forces faible et électromagnétique, découverte confirmée ensuite par la production et l'observation, d'abord dans le SPS puis dans le LEP, des bosons W et Z. Ses succès sont le fruit d'un programme de recherche de pointe que seules les performances et la fiabilité de ses accélérateurs PS, SPS et LEP rendent possible.

Le LHC, qui prendra la relève du LEP à l'aube du troisième millénaire, sera l'élément central du futur programme de recherche du CERN. Avec lui, le CERN accédera à une position unique dans son domaine et attirera des chercheurs de tous les continents. Les résultats du LEP montrent qu'au-delà de la gamme d'énergie étudiée actuellement, le LHC permettra d'accéder à une physique radicalement nouvelle.

Un collisionneur proton-proton à luminosité élevée constitue aujourd'hui le seul moyen réaliste pour explorer ce domaine d'énergie. Le LHC est le seul projet existant dans le monde pour ce type de collisionneur. Il fournira une "clé" sans équivalent pour accéder à une compréhension plus approfondie de la structure de la matière et de la nature de l'univers.

La réutilisation de l'infrastructure du LEP et des accélérateurs existants PS et SPS comme injecteurs, permettra non seulement de réduire le coût du projet, mais aussi d'étudier les collisions entre protons ainsi que celles entre ions lourds, et ultérieurement entre électrons et protons.

Le LHC sera donc un instrument phare pour la recherche fondamentale, qui permettra de déboucher sur un vaste domaine encore inexploré.

Christopher H. Llewellyn Smith
Directeur général du CERN



La construction du LHC constitue le plus grand défi technologique de l'histoire du CERN. C'est pourquoi la réalisation du projet a été précédée d'un important programme de recherche et de développement. Ce travail de longue haleine, auquel des centaines de personnes de par le monde ont participé, assoit le projet sur des bases techniques fiables. Des solutions technologiques innovantes ont été mises au point en étroite collaboration avec l'Industrie et les Universités européennes.

C'est le cas notamment pour les principaux éléments de l'accélérateur utilisant la supraconductivité. Pour guider les faisceaux de particules du LHC dans le tunnel existant, il faudra plus d'un millier d'aimants supraconducteurs. Refroidis à $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit tout près du zéro absolu, les conducteurs de ces aimants offrent une résistance électrique quasiment nulle, ce qui autorise la production de champs magnétiques intenses avec une faible consommation d'électricité. L'utilisation de la supraconductivité à l'échelle industrielle rend possible la construction d'une machine qui aurait été économiquement irréalisable avec les techniques conventionnelles.

Par le passé, les développements technologiques sur lesquels se fondent les progrès des accélérateurs et des détecteurs de particules ont conduit à des applications dans de nombreux domaines. On peut citer entre autres le perfectionnement des diagnostics et des soins médicaux grâce à la caméra à positons, au scanner ou à la hadrons-thérapie. Le Web, inventé au CERN, a rendu l'accès au réseau Internet possible pour le grand public. Il est raisonnable de penser que le LHC aura lui-aussi des retombées pratiques en dehors du domaine scientifique.

Défi technologique, la construction du LHC inaugure également un nouveau mode de collaboration scientifique en réunissant, pour la première fois, des instituts du monde entier dans un projet commun.

Lyndon R. Evans
Directeur du projet LHC

1

Les fondements scientifiques du projet LHC

1.1

Le CERN en bref

Le CERN a pour mission d'étudier la structure ultime de la matière en recréant les conditions qui prévalaient dans l'univers juste après le Big Bang. Son domaine d'activité est la physique des hautes énergies, dite aussi physique des particules élémentaires.

Concrètement, il conçoit, construit et fait fonctionner des accélérateurs de particules de haute énergie ¹ ainsi que des détecteurs, qui sont les grands instruments scientifiques d'observation des particules nécessaires aux travaux de recherche. Le CERN, le plus grand centre mondial de recherche en physique des particules, met ses installations à la disposition de près de la moitié des physiciens des particules du monde entier. Il accueille ainsi quelque 6 000 scientifiques qui viennent y effectuer leurs travaux de recherche. En relation avec les universités et instituts de physique des hautes énergies européens, il organise la sélection des expériences qui utiliseront ses équipements et prend lui-même une part active aux recherches. Enfin, il organise et encourage la coopération internationale, aussi bien dans le cercle de ses Etats membres qu'à

1. Il en possède actuellement trois : un synchrotron à protons (PS) de 100 m de rayon, un supersynchrotron à protons (SPS) de 1 100 m de rayon, qui a aussi été utilisé comme anneau de stockage et de collisions pour protons et antiprotons, et un anneau de stockage et de collisions à électrons-positons (LEP) de 27 km de circonférence.

l'extérieur (Etats-Unis, Canada, Russie, Chine, Inde, Japon, Brésil, etc.), et ses liens avec les laboratoires nationaux sont particulièrement étroits.

Concentrant les moyens européens en physique des particules, le CERN est le fruit d'un vaste effort collectif, qui rassemble des personnes de formations et de talents très variés. Cela contribue à en faire un laboratoire largement ouvert, dont le fonctionnement repose d'ailleurs sur le principe de la libre circulation des personnes et des idées. Les résultats de ses travaux sont diffusés et accessibles à tous.

Le CERN est l'un des éléments essentiels d'une vaste coopération internationale qui s'étend à tous les pays où la physique des particules est active, en Europe, en Amérique et en Asie. En mettant ses installations à la disposition de centaines de jeunes chercheurs qui se familiarisent ainsi avec des méthodes et des technologies de pointe, le CERN joue un rôle de formation particulièrement important.

La contribution du CERN à l'évolution du savoir est d'abord scientifique : par les progrès accomplis dans notre connaissance de la matière et des particules élémentaires qui la composent, ainsi que des forces qui les gouvernent. Trois prix Nobel en moins de dix ans (C. Rubbia et S. Van der Meer en 1984 et G. Charpak en 1992) sont venus souligner l'importance des travaux qui y sont menés.

Cette contribution est aussi technologique. En effet, pour construire les accélérateurs et les détecteurs les plus performants, il faut franchir les limites du savoir-faire technique du moment et développer de nouvelles technologies, notamment dans les domaines de l'électronique, de l'informatique, des aimants, de la supra-conductivité, de la cryogénie, du vide et de la mécanique.

L'industrie européenne est étroitement associée à ces développements technologiques et bénéficie par là-même, directement ou indirectement, de sa collaboration avec le CERN. En outre, d'autres sciences y ont puisé des concepts et des méthodes qu'elles utilisent à leur tour ; ainsi, la physique des particules a aujourd'hui des relations étroites avec l'astrophysique, la biologie moléculaire, la physique de l'état solide ou l'instrumentation médicale.

Avec ses 27 km de circonférence entre lac Léman et Jura, le collisionneur électrons-positons LEP du CERN est actuellement le plus grand accélérateur de particules du monde. Le LEP a été construit en vue d'explorer le domaine des masses jusqu'à 100 GeV, ce qui correspond à une dimension de 10^{-18} m (un milliardième de milliardième de mètre).

Les succès du LEP soulèvent cependant d'autres questions fondamentales pour l'évolution future de la physique. Afin que l'expérimentation puisse y apporter des réponses, il est nécessaire de progresser d'un ordre de grandeur dans le pouvoir de pénétration à l'intérieur de la matière : c'est le but du projet LHC.



Figure 1.1

Le tunnel du LEP, où va être installé le LHC

1.2

Le LHC, prochain maillon d'une chaîne d'accélérateurs

1.2.1

Le passé

Au cours des premières décennies du XX^e siècle, les progrès de la physique ont été dominés par les réalisations de l'Europe, de la découverte de l'électron à celle du noyau atomique et de ses constituants, de la relativité restreinte à la mécanique quantique. Les conflits des années trente et quarante ont interrompu cette suprématie, de nombreux scientifiques devant gagner des rivages plus calmes. Le retour de la paix allait révéler des changements décisifs.

Au début des années cinquante, les Américains avaient compris que, pour progresser, il fallait se doter d'instruments plus complexes et que l'investissement dans la science fondamentale pouvait être un moteur du développement économique et technologique. Alors que les scientifiques européens travaillaient encore avec des équipements simples, de puissants accélérateurs étaient en construction aux Etats-Unis. Les expériences légères se faisaient distancer par des projets mobilisant des équipes nombreuses de scientifiques et d'ingénieurs.

Des physiciens et des politiques européens clairvoyants, comme De Broglie, Rabi, Amaldi, Auger ou de Rougemont, comprirent que seule la coopération

permettrait à la recherche d'avant-garde de progresser en Europe. Malgré des traditions intellectuelles et des universités prestigieuses, aucun pays européen ne pouvait se maintenir dans la course avec ses propres ressources uniquement.

La création d'un laboratoire européen fut recommandée lors d'une réunion de l'UNESCO tenue à Florence en 1950, et moins de 3 ans plus tard, 12 pays signaient la Convention instituant le Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. Ainsi naquit le CERN, prototype d'une série d'institutions scientifiques européennes dans les domaines de l'espace (ESA), de l'astronomie (ESO) et de la biologie moléculaire (EMBL) : l'Europe était dès lors à même de reprendre sa place éminente dans le monde scientifique.

1.2.2

Le présent

La principale raison d'être du CERN est de fournir aux physiciens européens des accélérateurs répondant aux exigences d'une recherche à l'extrême pointe de la connaissance humaine. L'objectif consistant à obtenir des énergies d'interaction plus élevées a conduit le Laboratoire à jouer un rôle de premier plan dans la mise au point de machines à collisions de faisceaux.

Des "premières" marquantes ont été réalisées au CERN : la mise en service en 1971 d'un collisionneur proton-proton, les ISR (pour Intersecting Storage Rings), et celle en 1981 du collisionneur proton-antiproton au SPS (Supersynchrotron à protons), qui a produit deux ans plus tard les particules massives W et Z, confirmant la théorie unifiée des forces électromagnétique et faible.

La grande impulsion est donnée aujourd'hui par le LEP. Il permet de mettre à l'épreuve avec une précision jusqu'ici inégalée le *modèle standard*, qui est, à l'heure actuelle, notre meilleure description de la nature à l'échelle sub-atomique (voir figure 1.7 à la page 11).

L'énergie du LEP doublée en 1996 ouvre les portes d'un nouveau domaine de découverte important. Quantité de nouveaux résultats devraient être obtenus au LEP d'ici la fin de la décennie, lorsque ses missions auront été menées à bien.

1.2.3

Et l'avenir ?

Du fait de leur extrême précision, les données enregistrées par le LEP sont sensibles à des phénomènes qui surviennent à des énergies supérieures à celles de la machine elle-même ; elles sont comparables à des mesures fines de vibrations causées par un tremblement de terre loin de l'épicentre. Cela nous donne un "avant-goût" des passionnantes découvertes possibles à des énergies plus élevées et nous permet de calculer les paramètres d'une machine capable de conduire à ces découvertes.

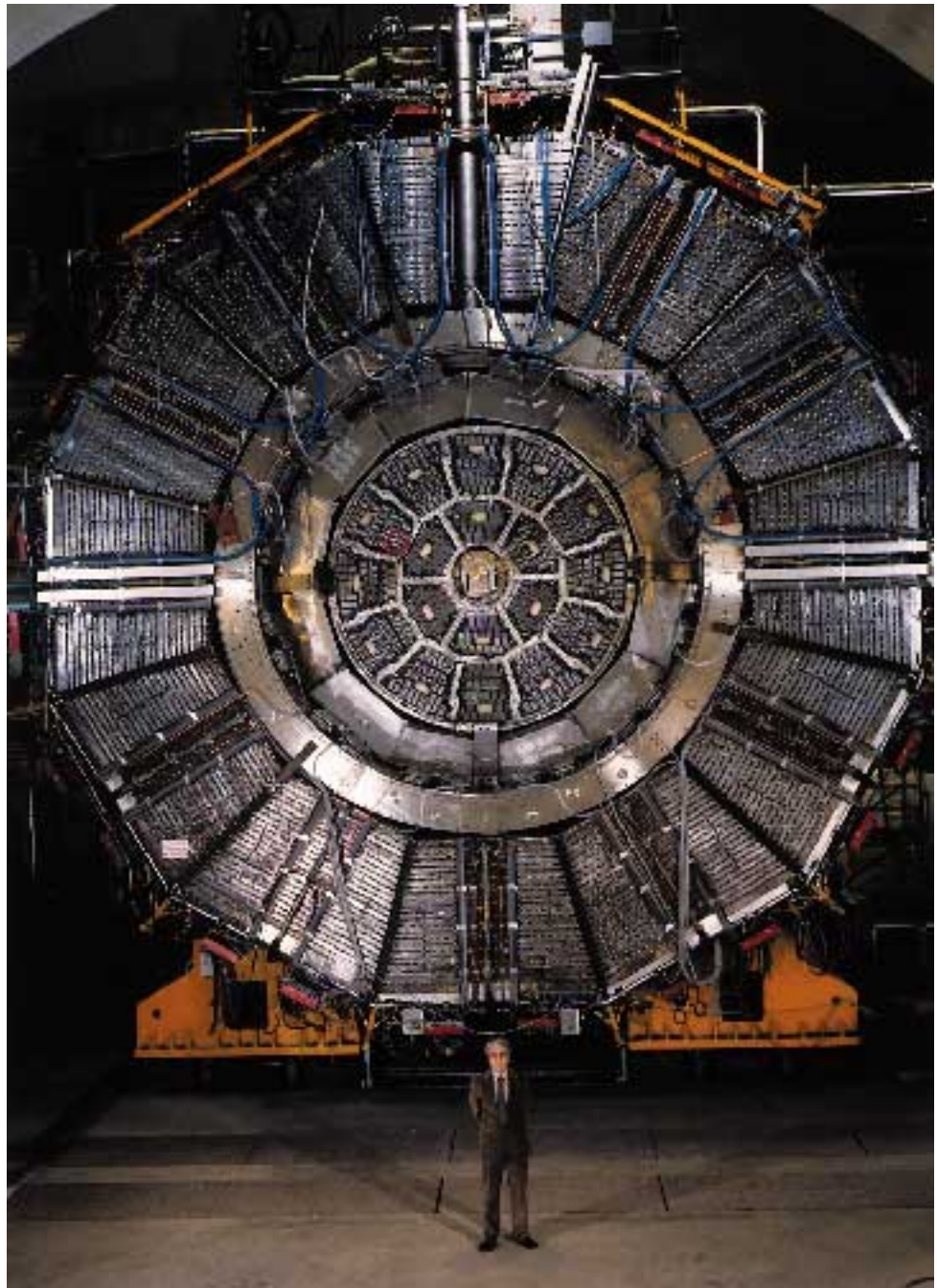


Figure 1.2

Un des quatre détecteurs du LEP

Tout indique que la physique de demain et ses réponses à quelques-unes des questions les plus fondamentales pour la science de notre époque se situent à des énergies de l'ordre de 1 TeV (1 TeV = 1 000 GeV). C'est la prochaine barrière à franchir.

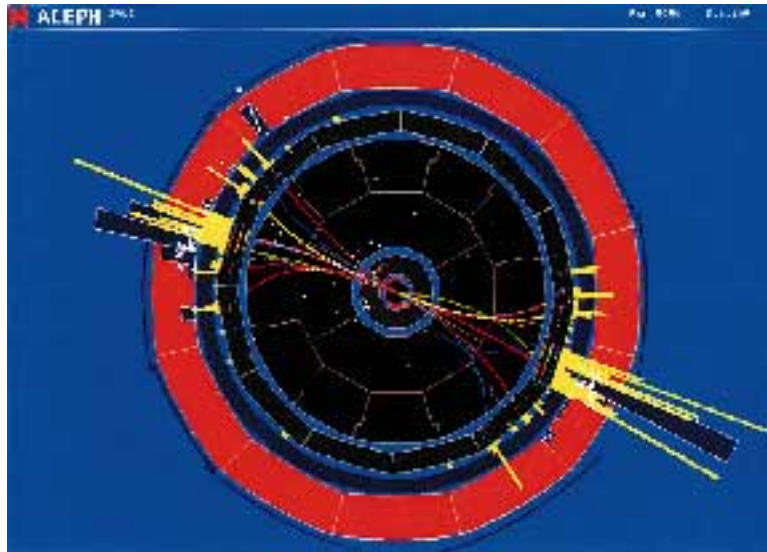


Figure 1.3

Enregistrement d'une collision de particules dans le LEP

Un groupe de travail composé d'éminents scientifiques, le LRPC (Comité de planification à long terme) présidé par le professeur Carlo Rubbia, s'est penché dès 1985 sur l'avenir scientifique et technologique du CERN. Le LRPC a estimé qu'une fois achevée la mission du LEP, l'Europe aurait besoin d'une installation dans la gamme des TeV pour s'intéresser à de nouvelles questions importantes en physique des particules élémentaires, et se maintenir au premier plan dans ce domaine. Le groupe de travail a examiné différentes options pour cette installation, mettant en balance le potentiel offert pour la recherche, les technologies accessibles et le coût estimatif. Les conclusions, présentées au Conseil du CERN en juin 1987, sont brièvement résumées ci-dessous.

En principe, un collisionneur électron-positon est idéal pour l'étude de la matière sub-nucléaire ; en effet, les interactions d'électrons et de positons, qui n'ont pas de structure interne, produisent des événements qui ressortent nettement, sur un fond relativement propre. C'est pourquoi le CERN a construit le LEP. Cependant, en matière d'accélérateurs circulaires, le LEP a atteint la limite du raisonnable. Un collisionneur linéaire serait donc la seule possibilité qui s'offrirait pour l'étude des interactions électron-positon dans le domaine du TeV. Or, ces machines linéaires ont des exigences techniques qui nécessitent de nombreuses années de recherche et de développement avant de pouvoir être mises en œuvre à grande échelle.

L'existence au CERN d'un tunnel de grandes dimensions, ainsi que d'accélérateurs opérationnels et fiables, faisait d'un collisionneur proton-proton du type LHC un choix évident pour une machine rentable dans la gamme des TeV dans un avenir plus rapproché. En outre, la possibilité d'exploiter le LHC comme un collisionneur d'ions lourds et, ultérieurement, de protons et d'électrons, renforçait l'attrait du projet.

1.2.4

Le LHC est retenu

Le LRPC a estimé qu'un grand collisionneur de hadrons était un choix rationnel. La mise au point d'aimants supraconducteurs d'avant-garde à champ élevé paraissait réalisable dans le délai d'une décennie. L'expérience acquise au SPS ayant montré la difficulté de produire des faisceaux d'antiprotons suffisamment intenses pour donner les taux d'interactions requis à l'énergie du LHC, l'option proton-antiproton fut exclue. Le Comité proposa donc d'installer le collisionneur proton-proton LHC dans le tunnel du LEP.

La communauté scientifique mondiale fut invitée à se joindre à ce projet et l'espoir d'une réponse positive exprimé. Pour assurer la crédibilité du projet avant la demande officielle d'approbation, le LRPC proposa d'intensifier la collaboration avec les laboratoires extérieurs et l'industrie. Cette collaboration devait porter en particulier sur la mise au point des aimants supraconducteurs et le développement de détecteurs susceptibles de fonctionner dans les conditions extrêmes imposées par une telle machine.

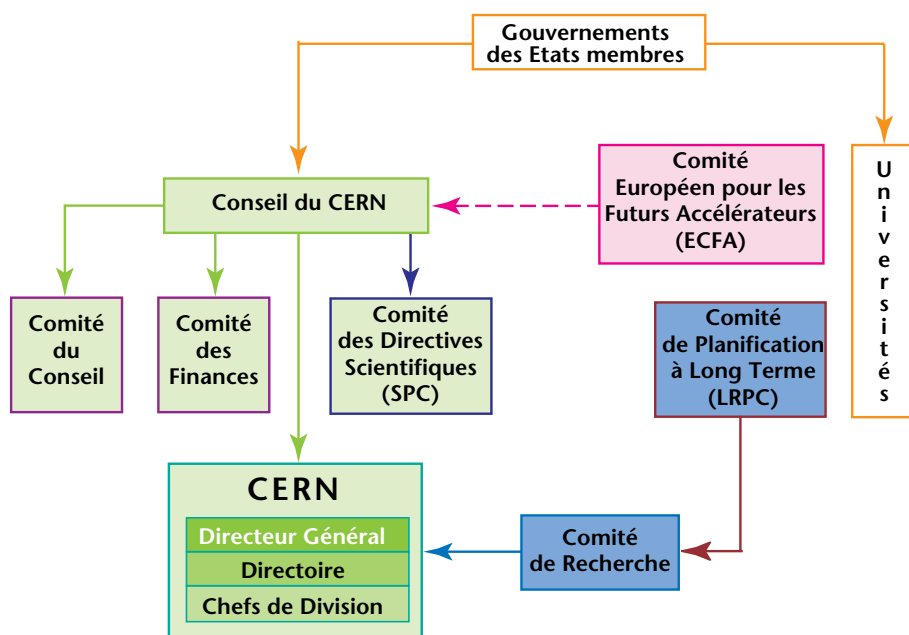


Figure 1.4

Schéma de décision des projets du CERN

En juin 1990, le Comité des directives scientifiques du CERN entérina la proposition et recommanda au Conseil de donner un premier signe de soutien au projet LHC. En décembre de la même année, l'ECFA (Comité européen pour les futurs accélérateurs) alla plus loin en recommandant que le projet soit approuvé dès que possible.

Un rapport technique détaillé sur la machine proposée fut publié au printemps 1991. Il reçut un accueil favorable du Comité d'évaluation du LHC, composé de

15 experts éminents d'Europe, des Etats-Unis et du Japon, qui présenta son rapport en juin 1991. Six mois plus tard, le Conseil, à sa session de décembre 1991, prenait acte dans une déclaration historique que "... le LHC est la machine qui convient pour assurer la poursuite de la mission du CERN et l'avenir de celui-ci".

Le projet LHC fut formellement approuvé par le Conseil du CERN lors de sa centième session le 16 décembre 1994 ¹.

1.3

La physique des cent dernières années

1.3.1

Des changements spectaculaires

Au cours du XIX^e siècle, expérimentateurs et théoriciens travaillèrent de concert à l'élaboration de modèles décrivant la matière et ses lois. Ces modèles reposaient sur les éléments chimiques classés dans le tableau périodique de Mendeleïev, sur l'unification des forces électrique et magnétique formulée dans les équations de Maxwell et sur la théorie de la gravitation de Newton expliquant les mouvements des corps célestes.

A l'aube du XX^e siècle, il apparut clairement que ces modèles étaient incomplets. L'ère moderne de la physique des particules s'ouvrait et notre connaissance de la nature était sur le point de subir une révolution complète.

En 1911, Rutherford découvrit que l'atome "indivisible" était constitué d'un minuscule noyau de charge positive entouré d'un nuage d'électrons de charge négative, ce "système planétaire" atomique étant soudé par la force électromagnétique.

Il a par la suite été démontré que le noyau contient des neutrons dépourvus de charge ainsi que des protons qui lui confèrent sa charge positive, la force forte maintenant ces particules étroitement liées les unes aux autres.

Des savants comme Becquerel et les Curie avaient déjà montré que les noyaux radioactifs se désagrègent parfois sous l'action d'une autre force, faible cette fois. Une forme de radioactivité, appelée désintégration bêta, est due à la transformation de neutrons en protons, et vice versa, à l'intérieur du noyau.

1. Document de référence : CERN/2075/Final



Figure 1.5

Marie et Pierre Curie

Cette conversion suppose un changement de charge électrique, celle-ci étant équilibrée par l'émission d'un électron de charge négative et d'un électron de charge positive appelé positon. L'antimatière entrait en scène.

Toutefois le compte n'était pas bon. L'énergie totale des particules détectées après une désintégration bêta était inférieure à celle du proton ou du neutron initial. L'hypothèse fut émise que l'énergie manquante était emportée par une particule extrêmement légère, dépourvue de charge, appelée neutrino. De fait, ces neutrinos à interaction faible furent découverts expérimentalement, mais beaucoup plus tard, en 1956.

Au cours de la même période, on constata également que les théories classiques, qui décrivaient l'univers à des échelles en rapport avec l'expérience quotidienne, étaient impuissantes à expliquer de nouvelles observations. On découvrit que la vitesse mesurée de la lumière était indépendante de celle de sa source ou de l'observateur.

Einstein, par un coup de pur génie, résolut ce problème de la physique à l'échelle macroscopique. Sa nouvelle description, la théorie de la relativité

restreinte, a des conséquences étonnantes. Elle montre par exemple que la masse peut se convertir en énergie, et inversement, phénomène exprimé par la fameuse équation $E = mc^2$ où c représente la vitesse constante de la lumière.

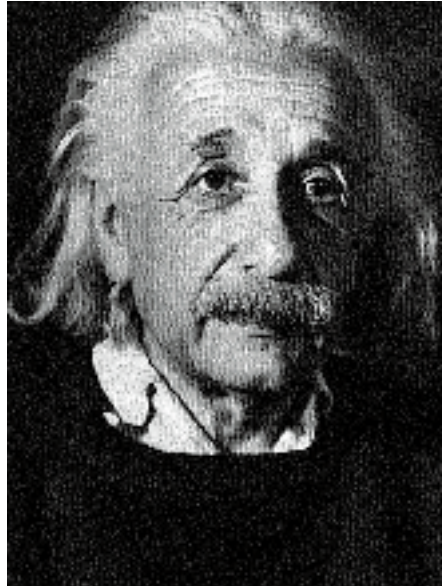


Figure 1.6

Albert Einstein

C'est pourquoi les physiciens utilisent indifféremment les termes "masse" et "énergie". Toutefois, la relativité restreinte ne s'appliquait qu'aux systèmes non accélérés. Einstein généralisa sa théorie de la relativité qui modifie radicalement la théorie de la gravitation de Newton en décrivant comment les corps célestes et terrestres sont accélérés les uns vers les autres. En outre, la physique classique ne pouvait expliquer ni la nature corpusculaire observée de la lumière (photons électromagnétiques) ni la nature ondulatoire correspondante des particules.

Une nouvelle description du monde microscopique dut être élaborée, la mécanique quantique. Les petites particules subissant une poussée suffisante se déplacent à des vitesses voisines de celle de la lumière où la relativité restreinte est importante. Il fallait donc donner un caractère relativiste à la mécanique quantique. Ainsi naquit la théorie très féconde connue sous le nom d'électrodynamique quantique, qui étend la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell au monde subatomique.

La seconde moitié du XX^e siècle s'ouvrit sur quatre particules de base, proton, neutron, électron et neutrino, et quatre forces apparemment indépendantes, les forces forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle. Toutefois, les différences frappantes entre ces particules et ces forces n'étaient nullement comprises.

Les découvertes résultant de l'exploitation des rayons cosmiques énergétiques venaient déjà étoffer le catalogue des particules connues et démontrer que la

liste était loin d'être complète. Les grandes percées réalisées dans le domaine des accélérateurs et des détecteurs ouvrirent la voie à une exploration plus poussée.

L'accélération des particules à des énergies plus élevées permirent aux physiciens de découvrir d'autres particules en nombre toujours plus grand. Dans les années soixante, les particules à interaction forte, appelées collectivement hadrons, et les particules à interaction faible, collectivement appelées leptons, étaient si nombreuses que le besoin de mettre à jour leur classification se faisait pressant.

Les données qui s'accumulaient indiquaient que les hadrons n'étaient pas élémentaires. Les expériences sondant la matière à l'aide d'électrons et de neutrinos de haute énergie révélaient que, aux très courtes distances, protons et neutrons sont dotés d'une structure. Mains aspects de la myriade de hadrons pouvaient maintenant être expliqués si, comme le proton et le neutron, ils étaient composés de nouveaux constituants élémentaires, appelés quarks. La force forte "nucléaire" fut réinterprétée comme agissant entre ces quarks.

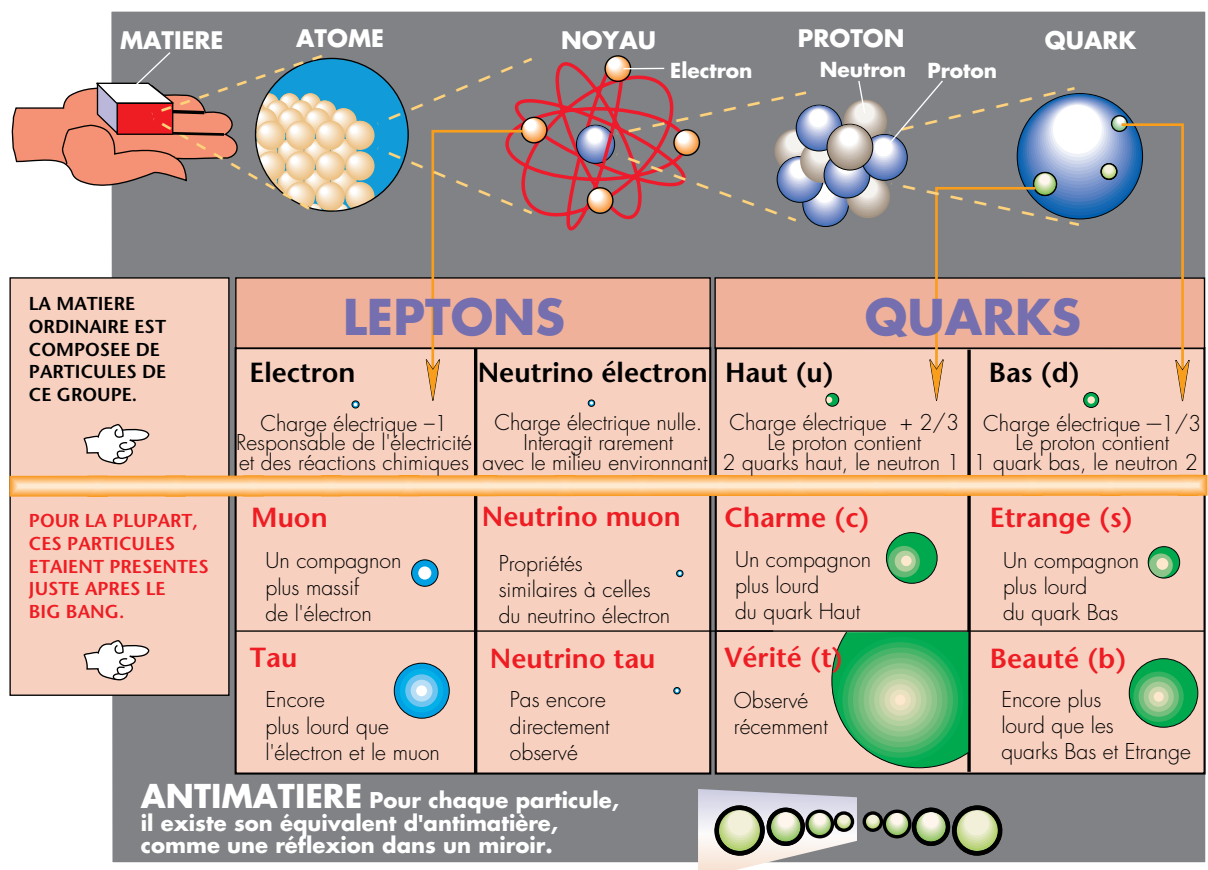


Figure 1.7

Le modèle standard

Les hadrons ou “sacs de quarks” purent être subdivisés en deux types : les baryons contenant trois quarks et les mésons contenant un quark et un antiquark. Les propriétés observées de la matière normale, celle dont nous sommes faits, pouvaient être expliquées grâce à deux sortes seulement de quarks, les quarks *u* pour *up* (haut) et *d* pour *down* (bas), et à deux leptons, l'électron et son neutrino.

La matière des rayons cosmiques de haute énergie, comme celle produite dans les accélérateurs, a révélé de nouvelles particules, à savoir le quark *s* pour *strange* (étrange) et deux autres leptons : le muon et son neutrino. A quoi pouvait-on attribuer les forces agissant entre ces particules de matière ?

A la fin des années soixante, Glashow, Weinberg et Salam élaborèrent une théorie, dite électrofaible, offrant une description unifiée de l'électromagnétisme et de la force faible de la radioactivité. Certaines des forces à l'œuvre entre les particules de matière avaient déjà été expliquées avec succès par l'échange de particules non matérielles appelées bosons. Ce phénomène s'apparente à l'échange d'une balle de tennis entre deux joueurs. Les photons de la lumière sont les bosons de la force électromagnétique. Yukawa avait suggéré que deux bosons chargés, l'un positivement et l'autre négativement, pouvaient transmettre la force faible. La nouvelle théorie faisait cependant intervenir un troisième boson dépourvu de charge, ce qui laissait supposer que des *courants neutres* circulent entre les particules à interaction faible, une idée tout à fait originale.

1.3.2

Les idées à l'épreuve de l'expérience

Le premier élément expérimental décisif en faveur de la théorie électrofaible avait été fourni par les installations du CERN en 1973. On avait alors observé des interactions mettant effectivement en jeu des courants neutres, bien que les bosons eux-mêmes n'aient pas été directement détectés.

Outre de nouveaux bosons, la théorie exigeait un quatrième quark lourd appelé *charme* ou *c*. En 1974, deux groupes américains observèrent séparément un méson, constitué d'un quark et d'un antiquark charme, baptisé J/ψ .

Peu après, un méson composé d'un quark charme et d'un antiquark haut fut observé, aussi aux Etats-Unis. Le quark charme rejoignait donc le quark étrange, le muon et son neutrino, déjà connus, pour compléter une deuxième famille de particules de matière, plus lourdes que leurs cousines du quatuor de particules de matière normale.

La théorie électrofaible, qui apparaissait dès lors très convaincante, prédisait que les masses des trois bosons de la force faible devaient être presque 100 fois plus lourdes que la masse du proton (1 GeV) et que ces particules apparaîtraient seulement lors d'interactions de haute énergie. La chasse était ouverte.

Les bosons W^+ , W^- et Z^0 furent découverts au CERN en 1983 par un groupe international, dirigé par Carlo Rubbia, utilisant le collisionneur proton-

antiproton SPS construit selon des principes inventés par Simon Van der Meer. Cette découverte leur valut le prix Nobel de physique en 1984. Elle renforça l'intérêt croissant pour les expériences au LEP, alors en construction au CERN, et pour l'exploration à des énergies encore plus élevées au moyen de collisions de hadrons dans un accélérateur tel que le LHC.



Figure 1.8

Jet de particules dans une chambre à bulles

Les physiciens cherchent maintenant à comprendre pourquoi trois des bosons électrofaibles ont une masse alors que le quatrième, le photon, en est dépourvu. En fait, pourquoi une particule a-t-elle une masse ? Telles sont quelques-unes des questions fondamentales auxquelles le LHC tentera de répondre.

1.3.3

Le tableau est plus net, mais...

En 1975, le premier membre d'une troisième famille de la matière, le lepton tau, plus lourd encore que l'électron et le muon, fut découvert au SLAC, aux Etats-Unis. L'un des deux quarks qui l'accompagnent, le quark "beauté", fut détecté au Laboratoire Fermi, Etats-Unis, en 1977. Pour compléter cette famille du modèle standard, au lepton du tau est associé son neutrino et au quark *beauté* (b), le quark *vérité* (t) ¹ découvert au Laboratoire Fermi au printemps 1994.

Ce système de familles peut-il être reproduit pour des particules encore plus lourdes ? La réponse, fournie par le LEP, est négative. Les Z^0 , produits en abondance dans des collisions électron-positon au LEP, se désintègrent rapidement en paires particule-antiparticule de quarks, leptons ou neutrinos.

1. t pour *truth*

Des mesures extrêmement précises ont montré que la désintégration se produit à un rythme qui s'explique par l'existence de 3 types de neutrinos, et donc de trois familles de matière, et trois seulement.

Le modèle standard donne une excellente description des données existantes. Nous savons toutefois que ce modèle est incomplet et qu'il n'apporte pas de réponses définitives à certaines questions, dont la plus importante est l'origine de la masse.

Bien que nous puissions faire entrer les quarks, leptons et bosons médiateurs de force dans un tableau relativement petit et exprimer beaucoup de leurs propriétés par des valeurs ayant entre elles des relations simples, telles que la charge positive, négative ou nulle, un coup d'œil à leurs masses pose une vraie énigme.

A la différence des éléments chimiques, les rapports de masse entre les constituants physiques ne montrent aucune régularité. Le lepton du tau est environ 17 fois plus lourd que le muon et 3 490 fois plus lourd que l'électron. Des rapports tout aussi mystérieux existent entre les quarks et les bosons. Ce sont des manifestations de lois qui dépassent notre compréhension pour le moment.

Le LHC a pour buts d'élucider le mécanisme par lequel les particules acquièrent une masse et de résoudre l'énigme des valeurs de ces masses. Selon un des mécanismes possibles entrant dans le cadre du modèle standard, les particules massives interagissent avec des bosons spéciaux, appelés bosons de Higgs en l'honneur de l'un des théoriciens qui ont formulé cette idée. La propriété d'une particule, que nous appelons sa "masse", serait le résultat de cette interaction avec des bosons de Higgs.

On pense que les bosons de Higgs "donneurs de masse" sont lourds. Bien qu'il ne soit pas exclu que le boson de Higgs se révèle à l'énergie maximum du LEP, le TeV a été retenu pour le LHC parce qu'il couvrira toute la zone dans laquelle les bosons de Higgs devraient se manifester.

Le mécanisme de Higgs décrit à la fois les grands principes de l'acquisition d'une masse par les particules et les conditions dans lesquelles ces principes peuvent être mis en lumière. La manière précise dont la Nature met en œuvre cette idée générale est cependant inconnue.

Il est possible que le boson de Higgs soit une particule élémentaire mais aussi qu'il soit composé de constituants à très forte interaction, qualifiés de "technicolor" par analogie avec la propriété de "couleur" des quarks. En pareil cas, il pourrait exister une multitude de nouvelles particules formées à partir de ces constituants et pesant environ 1 TeV. En revanche, si le boson de Higgs est réellement une particule élémentaire, les théoriciens suggèrent l'existence de très nombreuses particules à interaction faible, dites *supersymétriques*, de masse inférieure ou à peu près égale à 1 TeV.

Les particules supersymétriques sont les répliques exactes des particules ordinaires, si ce n'est que leur moment angulaire (le spin) est différent. Par exemple, le correspondant supersymétrique d'un électron, lequel est doté de spin, lui serait identique mais dépourvu de spin.

Cette idée élégante est importante pour deux raisons principales: d'une part, sa formulation mathématique relie naturellement la gravitation et les autres forces à des distances relevant du domaine quantique, une question ignorée par la relativité générale ; d'autre part, l'observation astrophysique du comportement de certaines gigantesques structures cosmologiques, comme les galaxies, montre qu'environ 90%, peut-être même 99%, de la matière de l'univers n'ont pas été vus à ce jour. Ces particules pourraient entrer dans la composition de cette matière obscure non observée, leurs concurrents étant les neutrinos, à condition que ces derniers aient une masse non nulle.

1.3.4

Vers l'origine de l'Univers

Nous commençons à constater que le chemin de la découverte nous fait remonter le temps, peut-être jusqu'au début de toute chose. L'une des nouveautés les plus fascinantes des dernières années récentes est la symbiose croissante entre la physique des particules élémentaires, c'est-à-dire de l'infiniment petit, et la cosmologie, science dont l'objet est l'étude de la structure globale de l'univers et de la formation de ses structures internes.

La cosmologie dite du Big Bang, sous sa forme actuelle, date de 1965, année où Penzias et Wilson découvrirent fortuitement le rayonnement thermique qui remplit l'univers à la température d'environ 2,7 Kelvin ($-270,7^{\circ}\text{C}$). Cette découverte convainquit de nombreux physiciens que notre univers est né il y a à peu près dix milliards d'années d'une explosion gigantesque à une température et avec une densité d'énergie extrêmement élevées, et que, depuis lors, il ne cesse de se dilater (ou plus précisément de s'étirer) et de se refroidir.

Au cours de la première seconde de la vie de notre univers, certaines questions tout à fait fondamentales trouvèrent une solution, relevant dans tous les cas de la physique des particules. On peut citer entre autres la synthèse de quelques-uns des éléments chimiques de l'univers, qui est régie par le nombre de types de neutrinos, l'homogénéité de l'univers (qui apparaît très semblable de quelque point qu'on l'observe) et son isotropie (son aspect est le même dans toutes les directions), qui pourraient être dues à un analogue du boson de Higgs.

Aujourd'hui, dix milliards d'années plus tard, les physiciens provoquent des collisions entre des noyaux lourds de haute énergie, tels que le plomb, pour tenter de créer de minuscules "bulles" de la matière excessivement chaude et dense qui existait une fraction de seconde seulement après le Big Bang.

On s'attend à ce que, dans ces conditions, les quarks et gluons ne soient plus confinés à l'intérieur des "sacs de particules" mais se déplacent librement dans

des volumes plus grands, formant ce qu'on appelle un plasma quark-gluon. Des tentatives pour créer des formes de matière aussi nouvelles sont faites au CERN et ailleurs.



Figure 1.9

Du Big Bang à nos jours

Dans l'avenir, les installations actuelles du CERN serviront à injecter des noyaux lourds accélérés dans le LHC où se produiront des collisions à une énergie totale de beaucoup supérieure à 1 000 TeV. Les conditions extrêmes de température et d'énergie ainsi créées devraient notablement accroître les chances d'observer

de nouvelles phases de la matière, et peut-être recréer en laboratoire les conditions où s'est trouvée la matière immédiatement après le Big Bang.

Une autre observation étonnante de l'astrophysique est la prédominance de la matière sur l'antimatière dans l'univers actuel. S'il existait à l'origine une symétrie inhérente entre la matière et l'antimatière, qu'est-ce qui a empêché l'annihilation mutuelle de se poursuivre jusqu'à ce que rien ne reste sinon l'énergie radiative ? En 1967, Sakharov fit observer que l'heureux déséquilibre existant pouvait être attribué à des interactions primordiales de particules élémentaires qui distinguaient la matière de l'antimatière. Une contribution à cette asymétrie est déjà à l'étude en laboratoire.

On pensait que l'antimatière était une "réflexion" parfaite de la matière, au sens où les lois de la physique ne changeraient pas si toutes les particules étaient remplacées par leurs antiparticules et que nous observions le résultat dans un miroir. C'est ce qu'on appelle dans le jargon de la physique la symétrie CP où C représente la conjugaison de charge, l'échange de particules et d'antiparticules, et P la parité, le processus vu dans un miroir.

En 1964, Cronin et Fitch observèrent la violation de la symétrie CP dans des désintégrations d'un type de mésons appelés kaons. Le fait que les lois de la physique ne soient pas exactement identiques dans un "miroir CP" est maintenant imputé au comportement de quarks et antiquarks lourds dans les kaons. Des mesures précises de cet effet minime mais important sont extrêmement difficiles.

Les kaons contiennent des quarks étranges et le modèle standard prédit que la violation de CP devrait se manifester aussi dans des désintégrations de mésons B qui contiennent les quarks b plus lourds. Les collisions proton-proton au LHC seront une source très abondante de mésons B. On pourra donc multiplier ces mesures qui, de manière surprenante, sont étroitement liées à la quantité totale de matière dans l'univers, et mettent le modèle standard à rude épreuve.

1.3.5

Le LHC : vers un nouveau paysage

Dans ces quelques pages, nous avons montré que le LHC contribuera à la physique fondamentale dans un large éventail de secteurs importants, allant de l'origine de la masse à l'absence d'antimatière dans l'univers, et qu'il nous permettra de nous rapprocher encore des premiers instants après le Big Bang.

Les jours du modèle standard sont comptés et quelque chose d'autre devra prendre sa place. Notre prochain modèle sera une nouvelle mosaïque complexe de connaissances dont il faudra assembler minutieusement les pièces imaginées par les théoriciens et découpées par les expérimentateurs.

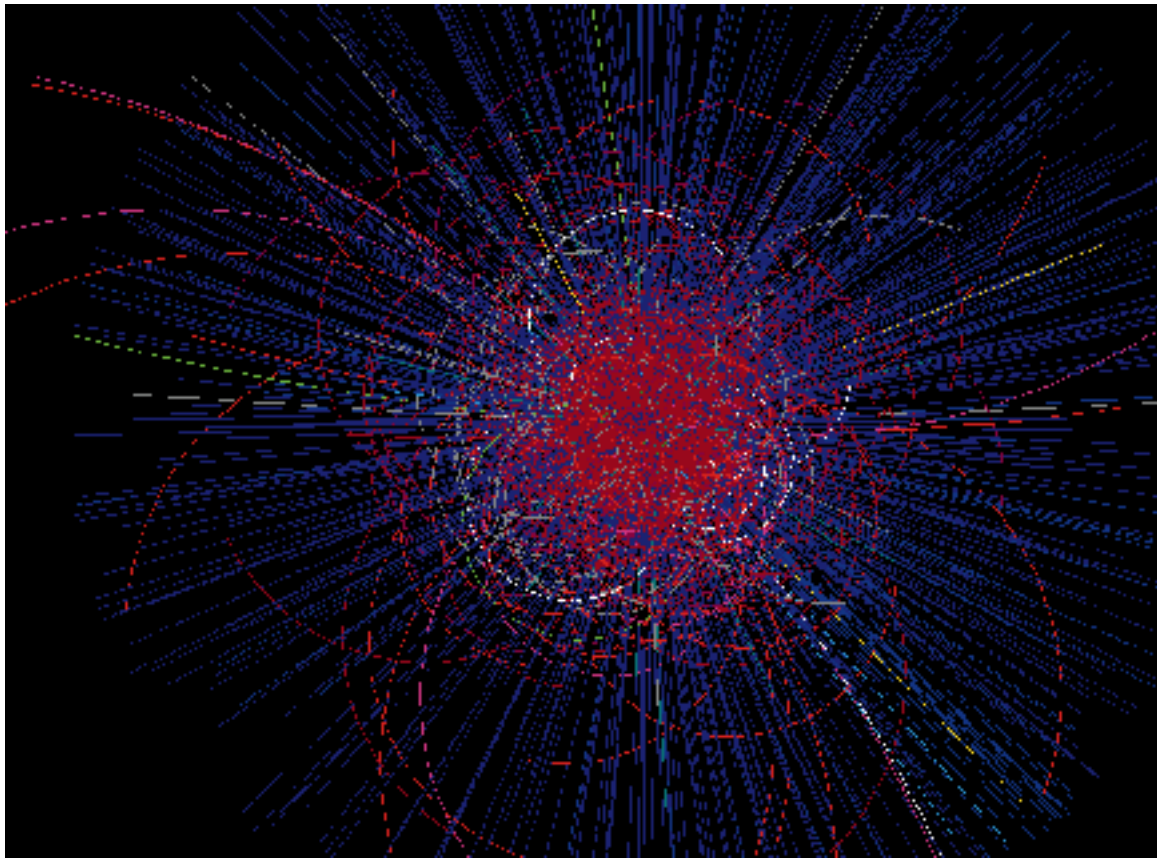


Figure 1.10

Simulation de la détection d'une paire quark-antiquark dans le LHC

Avec les bosons de Higgs, les particules composites "technicolor" et les particules supersymétriques en concurrence pour une place dans ce monde nouveau, la gamme d'énergie du TeV est manifestement un domaine crucial et fécond à explorer. Après le LEP, nous parcourrons avec le LHC l'étape suivante qui nous conduira en territoire vierge, où une énergie 10 fois plus élevée nous rapprochera d'autant du Big Bang.

Outre l'énorme potentiel de découverte de ce collisionneur proton-proton, le LHC une fois relié aux machines existantes du CERN pour accélérer des noyaux lourds et les faisceaux d'électrons du LEP, composera un ensemble unique d'instruments scientifiques. Dotés de ces installations superbes, les physiciens du XXI^e siècle seront en mesure de faire progresser la quête commencée par Démocrite et d'affiner la représentation du monde qui nous entoure.

2

Description du projet LHC : l'accélérateur

2.1

Les données de base du projet LHC

Le LHC est un accélérateur collisionneur de hadrons à très haute énergie et grande luminosité utilisant au maximum l'infrastructure existante du CERN.

Cette définition synthétique du LHC utilise des termes courants dans le domaine de la physique des particules mais qu'il convient de définir.

Dans un *accélérateur collisionneur*, deux faisceaux de particules préalablement accélérées circulant pratiquement à la vitesse de la lumière tournent en sens inverse et se croisent à des points fixes, précisément choisis pour provoquer des collisions frontales entre particules. Lors du choc, un grand nombre de nouvelles particules sont produites, qui sont ensuite étudiées par les chercheurs.

Autour de chaque point de collision du LHC est donc installé un ensemble d'appareils de détection de particules, appelé *détecteur*. Son rôle est d'observer et d'enregistrer les produits des collisions. Un détecteur est une grande installation scientifique permanente, avec laquelle un nombre considérable de mesures physiques sera effectué au cours des 10 à 20 ans de sa vie opérationnelle.

Parmi les millions de particules produites chaque seconde, les systèmes électroniques et de calcul en ligne doivent identifier les quelques centaines de particules correspondant à la réaction que les physiciens ont décidé d'étudier.

Le LHC est conçu pour accélérer des particules lourdes appelées *hadrons*. Il s'agit en l'occurrence de protons, noyaux de l'atome d'hydrogène. Toutefois, l'accélération de noyaux plus lourds appelés ions, tels que le plomb, est aussi possible. Contrairement aux particules légères appelées *leptons* utilisées dans le LEP (électrons et positons), les hadrons sont des particules composites formées de quarks. Les protons et les neutrons, qui sont les constituants des noyaux de tous les atomes, sont eux-mêmes un assemblage de trois quarks.

L'énergie des particules circulant dans un accélérateur est exprimée en électronvolts (eV). Un électronvolt équivaut à l'énergie acquise par un électron accéléré sous une tension de un volt.

Dans un poste de télévision, les électrons ont une énergie d'environ 20 000 électronvolts (20 keV) ; dans un accélérateur collisionneur comme le LEP, ils atteignent des énergies de l'ordre de 100 milliards d'électronvolts (100 GeV). Bien que ces énergies soient les plus élevées produites par l'homme sur Terre, c'est leur concentration et non pas leur quantité qui est déterminante, car elles s'appliquent à un volume infiniment petit. Les protons du LHC atteignent une énergie de 7 000 milliards d'électronvolts (7 TeV) au moment de la collision. L'énergie atteinte par les protons dans le LHC est 15 fois supérieure à celle atteinte dans le SPS, son injecteur, et plus de 200 fois supérieure à celle du premier collisionneur de protons du CERN, les anneaux de stockage ISR.

Les protons vont tourner pendant des heures dans le LHC à une vitesse proche de celle de la lumière (300 000 km/s). Au cours de leur long périple, les protons des deux faisceaux vont se croiser tous les 89 milliardièmes de seconde. A chaque croisement, un faible nombre d'entre eux, un sur 100 000 seulement, va interagir en subissant une collision frontale. Pour étudier des phénomènes rares, il faut un grand nombre d'interactions par seconde. Le nombre d'interactions par seconde est, pour une réaction donnée, déterminée par ce qui est appelé *luminosité*. Une luminosité élevée est obtenue en disposant du plus grand nombre possible de protons dans chaque faisceau (3×10^{14}) et en rendant le faisceau très dense par une diminution de sa section aux quatre points de collision (16 micromètres de diamètre).

La luminosité baisse au cours du temps au fur et à mesure que les protons interagissent et que la qualité des faisceaux se dégrade. Il faut alors remplir une ou deux fois par jour les anneaux du LHC avec des protons pré-accélérés par le PS et le SPS. Le temps au bout duquel la luminosité a perdu la moitié de sa valeur initiale s'exprime par le terme "durée de vie de la luminosité".

2.1.1

Réutilisation de l'infrastructure existante

Outre son personnel expérimenté et hautement qualifié, l'un des principaux atouts du CERN est son infrastructure. Les installations de base, sous la forme de bâtiments, de réseaux de distribution d'eau, de gaz, d'électricité, ainsi que des ateliers bien équipés et un centre de calcul puissant sont bien sûr à la disposition du projet. Le complexe d'accélérateurs actuellement en fonctionnement constitue la chaîne des injecteurs du LHC.

L'apport principal consiste à utiliser le tunnel du LEP, dont le plan est incliné pour réduire la profondeur des puits au pied du Jura.

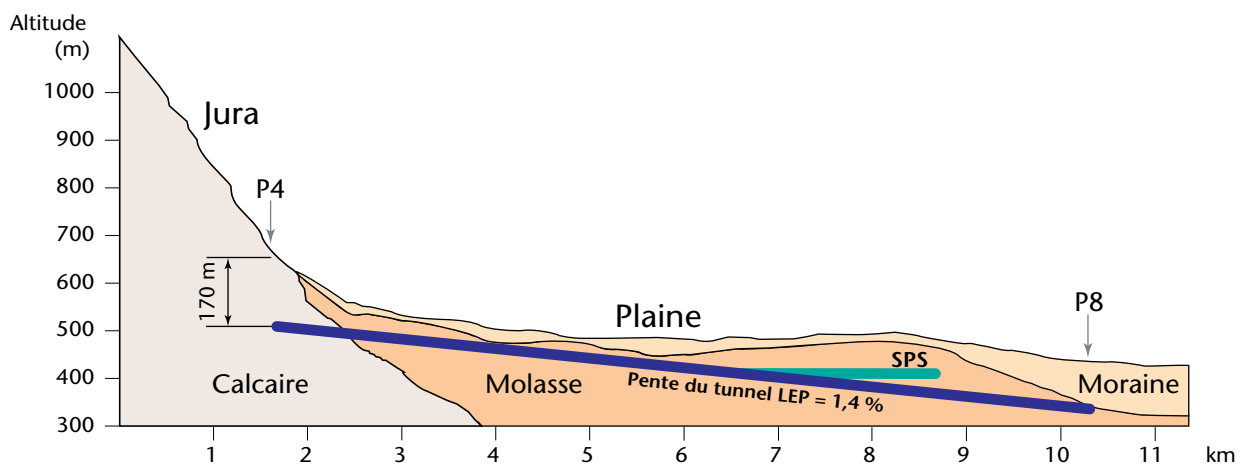


Figure 2.1

Plan incliné du tunnel du LEP

La géométrie de ce tunnel, sa circonférence et ses dimensions intérieures, sont déterminantes dans le choix des caractéristiques du LHC. Les choix technologiques et les performances attendues du LHC doivent concilier les dimensions du tunnel et les performances des injecteurs existants avec les défis lancés par ce projet.

2.1.2

Un puissant champ magnétique de guidage

Le choix de la taille du LEP, c'est-à-dire de la circonférence du tunnel, avait été le résultat d'un compromis entre le coût de construction, qui imposait de limiter sa taille, et le coût d'exploitation, qui poussait à choisir l'anneau le plus grand possible. En effet, plus le rayon de courbure est petit, plus le faisceau de leptons perd de l'énergie par rayonnement sous forme de lumière.

L'énergie ainsi perdue doit être restituée au faisceau par un puissant ensemble de cavités accélératrices radiofréquence. Le coût d'exploitation (énergie électrique consommée) est un facteur limitatif de ce type de machine. Il en va tout autrement dans les machines hadroniques où le rayonnement synchrotronique à haute énergie est certes à prendre en considération mais n'est pas critique.

Pour courber les trajectoires des protons (2 000 fois plus lourds que les électrons) il faut des champs magnétiques intenses. Les dimensions du tunnel étant données, l'énergie maximum qu'il est possible d'atteindre dans le LHC est fixée par l'intensité du champ magnétique des aimants de guidage du faisceau (dipôles). Pour atteindre les champs réalisables les plus élevés, il faut faire appel à la supraconductivité.

Certains matériaux refroidis à très basse température présentent la propriété étonnante de n'opposer aucune résistance au passage du courant électrique. C'est pourquoi on les appelle supraconducteurs. Il n'y a plus de perte d'énergie par échauffement (effet Joule). Pour les bobines magnétiques du LHC, le matériau utilisé est l'alliage niobium-titane refroidi à une température proche du zéro absolu¹ ; il permet le passage de courants électriques très intenses sans pertes et à basse tension.

La seule énergie électrique consommée est celle qui sert à refroidir et à maintenir à ces très basses températures les quelque 30 000 tonnes d'aimants. Ces aimants sont placés dans des enceintes isolantes appelées cryostats. C'est grâce à l'utilisation de la supraconductivité, qui réduit la consommation électrique d'un facteur 30 par rapport à un système conventionnel, que le LHC devient possible.

Outre la circonférence du tunnel, sa section entraîne une autre contrainte importante. Les collisions entre particules identiques, donc de même charge électrique, s'obtiennent à partir de deux faisceaux circulant en sens contraires nécessitant des champs magnétiques de directions opposées. La taille du tunnel LEP ne permet pas de loger un ensemble d'aimants de guidage pour chaque faisceau, comme c'était le cas pour les ISR (voir figure 2.2).

Pour le LHC, il faut avoir recours à des aimants bien plus compliqués et adopter le concept de "deux en un", c'est-à-dire d'aimants à deux ouvertures dans lesquelles les deux faisceaux circulent en sens inverse.

Deux canaux magnétiques supraconducteurs sont logés dans la même culasse et dans le même cryostat : il s'agit là d'une configuration nouvelle et unique qui occupe beaucoup moins de place et dont le coût de production est réduit de 25% par rapport à deux systèmes de guidage distincts.

1. Le zéro absolu (0 Kelvin) correspond à une température de – 273 degrés Celsius. La température de fonctionnement du LHC est de 1,9 K, soit – 271 °C.



Figure 2.2

Ensembles de guidage et croisement des faisceaux aux ISR

2.1.3

Une utilisation extensive de la supraconductivité

L'ensemble des aimants de guidage et de focalisation devant être supraconducteurs, une très grande quantité de matériau supraconducteur est nécessaire.

On recourt à l'alliage niobium-titane (Nb-Ti), qui se prête particulièrement bien à la fabrication d'aimants. Pour augmenter le champ magnétique, il a été décidé d'opérer à très basse température : 1,9 Kelvin (K). Cette température correspond, pour le fluide caloporteur, l'hélium, à la phase appelée superfluide.

Cette solution, nouvelle à une telle échelle, bénéficie des propriétés de l'hélium superfluide, en particulier de sa conductibilité thermique très élevée, et offre ainsi une solution très originale pour l'évacuation de la chaleur. La conductibilité thermique de l'hélium superfluide est 10 000 fois plus élevée que celle du cuivre, ce qui en fait une sorte de "supraconducteur de chaleur".



Figure 2.3

Un réfrigérateur cryogénique du LEP

Les installations cryogéniques du LEP (figure 2.3) produisent déjà d'importantes quantités d'hélium liquide pour refroidir les cavités accélératrices. Elles sont renforcées et réutilisées par le LHC, et sont concentrées en surface au Point 1 et aux quatre points d'accès pairs du tunnel.

L'hélium est transporté dans des tubes inclus dans une ligne cryogénique séparée du cryostat principal de l'aimant, afin de disposer d'assez de place pour installer des tubes dont le diamètre assure le transport de l'hélium sur les longues distances requises.

2.1.4

Des collisions proton-proton mais aussi des collisions ion-ion et électron-proton

Le projet LHC est polyvalent. Il permet trois types de collisions : proton-proton et ion-ion dès son entrée en service, et la possibilité future de collisions proton-électron. Cette dernière option nécessite l'installation d'un anneau à électrons du type LEP au dessus du LHC.

Quatre zones d'expérimentation sont prévues selon le schéma de la figure 2.4. Les expériences qui y sont installées sont décrites au chapitre 3.

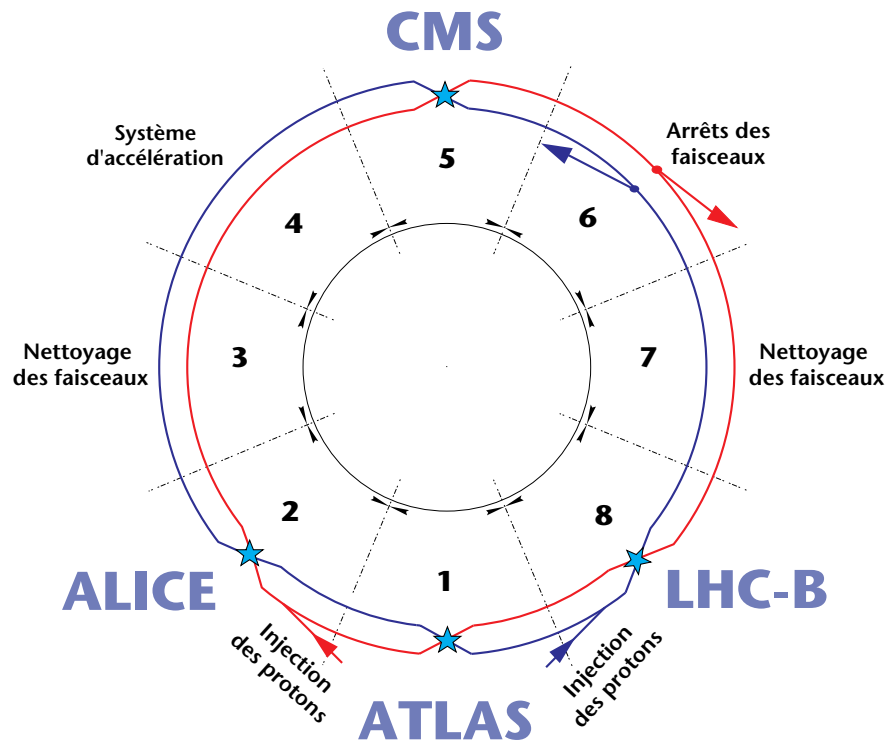


Figure 2.4

Schéma de principe du LHC

2.1.5

Un fonctionnement sûr et fiable

Les quatre points sans croisement de faisceaux (Points 3, 4, 6 et 7) abritent les zones techniques nécessaires au fonctionnement de l'accélérateur lui-même.

Au Point 4, on installe les systèmes d'accélération et d'amortissement des faisceaux de particules. Un ensemble de cavités radiofréquence pour chacun des deux faisceaux est prévu. Ces deux ensembles sont situés de part et d'autre de la zone d'expérimentation souterraine existante. La zone d'expérimentation du Point 4 reste ainsi libre et disponible pour un usage ultérieur.

Le Point 6 accueille le système d'éjection des deux faisceaux vers deux blocs absorbeurs abrités par deux halles à l'extérieur du tunnel LHC. En régime de fonctionnement normal, l'opération de décharge externe s'effectue une ou deux fois par jour, chaque fois que la densité des faisceaux, donc la luminosité, a baissé. Après 10 à 20 heures de collisions, un nouveau remplissage des anneaux est ainsi nécessaire. La décharge externe s'impose car l'énergie stockée correspond à plus de 300 MJ. Cette puissance, libérée à l'intérieur de la machine, endommagerait l'équipement installé. Pour supprimer ce risque, un système élaboré de surveillance de la qualité des faisceaux et des équipements provoque immédiatement les décharges externes des faisceaux circulant dans les anneaux au cas où une anomalie est détectée.

Durant leurs révolutions régulières, les protons rencontrent à chaque tour, soit les petites imperfections magnétiques, soit les molécules de gaz résiduel dans la chambre à vide, qui conduisent à de très faibles pertes en continu et à des gonflements des faisceaux (formation d'un halo). Ces pertes sont bien sûr réduites au minimum par le choix des paramètres de la machine. Si elles se produisaient dans les parties courbes, elles apporteraient de la chaleur aux aimants supraconducteurs. Ces pertes sur les supraconducteurs eux-mêmes pourraient conduire à des transitions résistives localisées (passage de l'état supraconducteur à l'état normal) qui se propageraient sur plusieurs aimants. Ces transitions provoqueraient l'arrêt de la machine.

Pour réguler ces mini-pertes ¹ et nettoyer les faisceaux, on utilise un système de collimateurs internes installé aux Points 3 et 7. Il s'agit là d'un système fondamental pour le fonctionnement du LHC, qui justifie que deux des quatre zones techniques lui soient consacrées.

Le principe consiste à créer une séparation des faisceaux et une restriction d'ouverture locale de la chambre à vide par un ensemble de collimateurs afin que ces derniers interceptent le halo des faisceaux et absorbent les mini-pertes. L'ensemble des collimateurs et des aimants est complètement blindé par des blocs d'acier qui absorbent toutes les radiations qui peuvent être produites.

2.1.6

Les paramètres techniques du LHC

L'énergie des collisions étant fixée par le champ magnétique, le second paramètre fondamental est la luminosité : c'est elle qui détermine la fréquence des collisions entre protons. Plus le nombre de collisions par seconde est grand, plus il est facile d'étudier des phénomènes physiques rares.

Les particules dans les faisceaux sont groupées en paquets et c'est aux points de croisement, où sont installés les détecteurs des expériences, que ces paquets se rencontrent et produisent les collisions. La luminosité est proportionnelle au nombre de paquets et au nombre de protons ou d'ions par paquet. Le produit de ces deux paramètres représente l'intensité totale circulant par faisceau.

Le nombre de protons ou d'ions par paquet étant limité, il reste alors à déterminer le nombre de paquets par faisceau pour que la cadence des collisions n'excède pas la capacité de saisie de l'électronique des expériences. Le choix est par ailleurs restreint par la chaîne des injecteurs. Ces derniers forment une sorte de série d'engrenages et leurs systèmes de radiofréquence doivent être synchrones au moment des transferts d'une machine à l'autre. Qui plus est, la régularité de la répartition des paquets le long de la circonférence est brisée par la nécessité de prévoir les "trous" pour réaliser les opérations d'injection et d'extraction des faisceaux sans perdre de particules. Chaque faisceau est ainsi composé de 2 835 paquets, eux-mêmes composés de 100 milliards de protons chacun. Ces

1. Ces mini-pertes représentent 50 W par secteur, ou l'équivalent de la puissance d'une ampoule électrique répartie sur 3,3 km.

paquets sont distants les uns des autres de 7,5 m et circulent à la vitesse de la lumière.

L'ensemble des paramètres simples et fondamentaux exprimés dans leurs unités conventionnelles est résumé dans le tableau 2.1 ¹.

Tableau 2.1

Paramètres techniques du LHC

Circonférence de la machine (m)	26 658,9
Section du tunnel \varnothing (m)	3,8
Séparation entre anneaux (mm)	194
Dipôles: champ magnétique (Tesla)	8,4
Dipôles: Ouverture des bobines (mm)	56
Dimension de l'écran de faisceau (mm ²)	36 x 44
Energie d'injection (GeV)	450
Energie en collision (TeV)	7
Fréquence système d'accélération (MHz)	400,8
Temps de révolution (μ s ^a)	88,9
Nombre de tours par seconde	11 250
Séparation entre les paquets (ns ^b)	25
Nombre de paquets par faisceau	2 835
Nombre de particules par paquet	10^{11}
Nombre de particules par faisceau	3×10^{14}
Courant circulant par faisceau (mA)	540
Energie maximale stockée en collision (par faisceau) (MJ)	334
Diamètre du faisceau au point de collision (μ m)	16
Luminosité (cm ⁻² s ⁻¹)	10^{34}
Durée de demi-vie de la luminosité ^a (heures)	10
Temps de remplissage d'un anneau (minutes)	3

a. demi-vie : temps au bout duquel la luminosité a baissé de moitié.

1. Une liste des unités de mesure est donnée en fin de volume.

2.2

Les principaux éléments de l'accélérateur

2.2.1

Les injecteurs

Tous les accélérateurs existants du CERN jouent un rôle dans la chaîne des injecteurs du LHC. Pour les protons, l'accélérateur linéaire Linac 2 fournit les protons à 50 MeV qui remplissent les quatre anneaux d'un accélérateur intermédiaire, le Booster du PS, dont l'énergie a été portée à 1,4 GeV.

Deux impulsions du Booster fournissent huit paquets au PS, le synchrotron de 26 GeV le plus ancien du CERN puisqu'il fonctionne depuis 1959. Ces paquets sont ensuite manipulés par le système de radiofréquence du PS et transformés en 81 paquets ayant la bonne séparation pour être transférés vers le SPS, le Super Synchrotron à Protons de 450 GeV, en trois impulsions successives.

Douze cycles successifs du SPS remplissent un anneau du LHC de 2 835 paquets. Cette opération est réalisée en trois minutes et a lieu en fonctionnement régulier une ou deux fois par jour. Le reste du temps, le PS et le SPS sont utilisés pour le programme de physique non lié au LHC (figure 2.5).

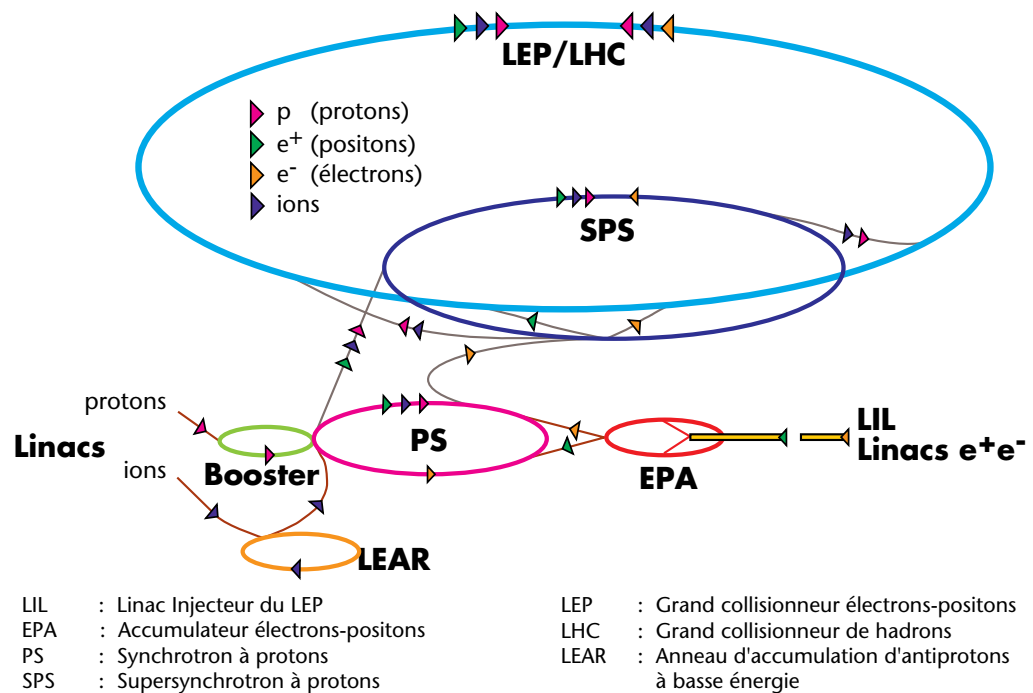


Figure 2.5

La chaîne des accélérateurs du CERN

Deux nouvelles lignes de transfert sont nécessaires pour rejoindre chacun des deux anneaux du LHC depuis le SPS. Elles sont logées dans deux tunnels, TI 2 et

TI 8 d'une longueur respective de 2,7 et 2,4 km, qui aboutissent aux Points 2 et 8 du LHC (voir figure 2.6).

Pour équiper ces lignes il faut 352 dipôles et 158 quadripôles, tous constitués d'éléments classiques ne faisant pas appel à la supraconductivité. Ces éléments ne sont activés que pendant un temps très court, au moment des transferts des faisceaux du SPS vers le LHC, et leur consommation électrique est donc faible.

En ce qui concerne les ions, plus difficiles à produire que les protons, le schéma est différent. En effet, pour atteindre les limites d'intensité par paquet, et donc obtenir une luminosité relativement importante, il faut produire au niveau des injecteurs une densité d'ions plus grande que celle actuellement produite pour la physique du SPS.

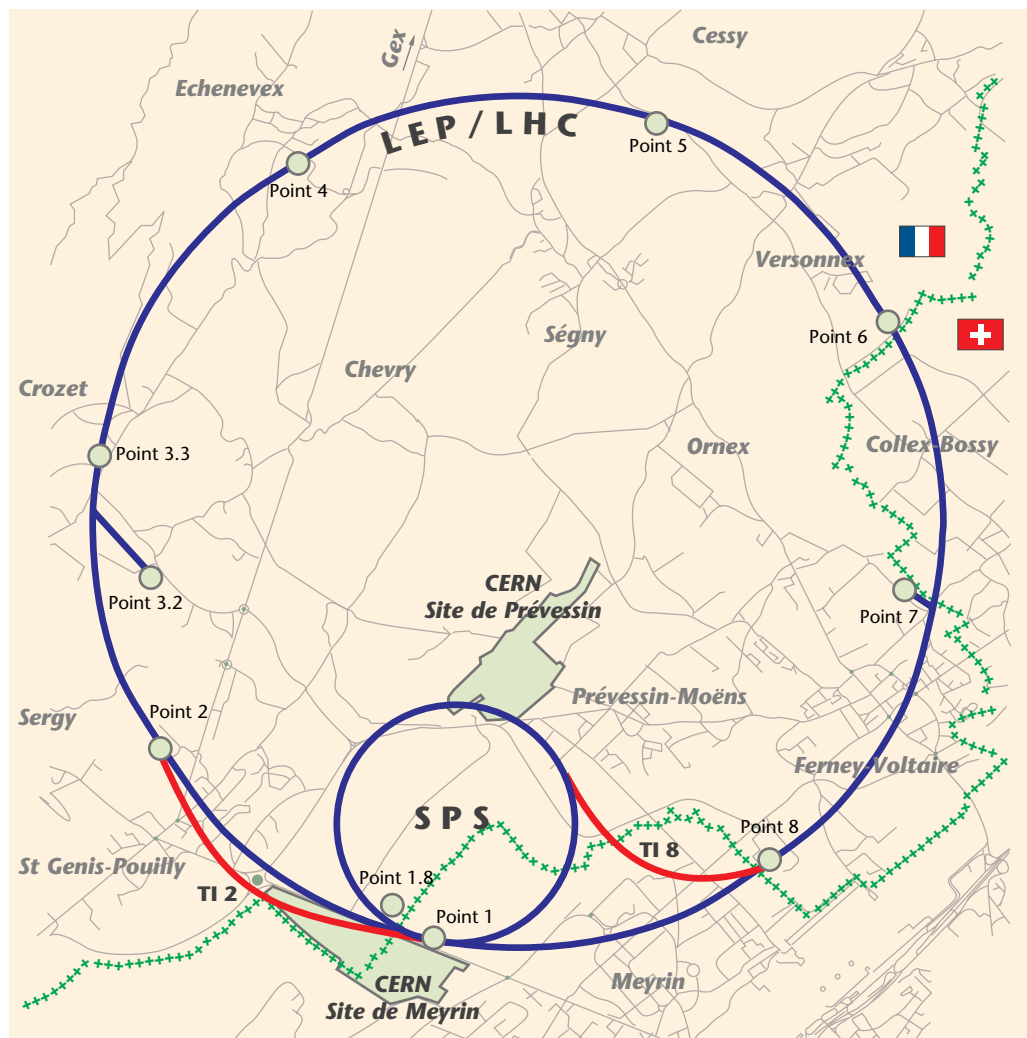


Figure 2.6

Tunnels de transfert TI 2 et TI 8

A cet effet, la plus petite et la plus récente des machines du CERN, le LEAR, entre en jeu. Cette machine sert actuellement d'accumulateur et de décélérateur d'antiprotons pour le programme de physique à très basse énergie. Le LEAR est entre autres équipé d'un système de "refroidissement du faisceau par électrons". Ce système permet d'augmenter la densité des particules circulantes en transférant une partie de leur mouvement d'agitation (leur "température") à un faisceau d'électrons "froids", issus d'une source à électrons et collectés après un parcours commun avec les ions à refroidir, pour être renouvelés. Les ions issus d'une source et de l'accélérateur linéaire (Linac 3) sont donc accumulés et refroidis dans le LEAR ; ils sont ensuite accélérés pour être envoyés dans le PS, puis dans le SPS et le LHC par un processus semblable à celui des protons.

La séparation entre les paquets d'ions dans le LHC est 5 fois plus grande que celle entre les paquets de protons, et il y a 608 paquets par faisceau dans le LHC pour un temps de remplissage de 10 minutes par anneau.

Dans une phase ultérieure, si le LHC devait être complété par un anneau à électrons, certains composants LEP qui seront conservés et stockés seraient disponibles. Le Linac injecteur du LEP (LIL) produirait et préaccélérerait les électrons, qui seraient ensuite accumulés dans l'anneau EPA avant d'être transférés vers le PS, puis le SPS pour continuer le cycle d'accélération.

2.2.2

La maille de la machine

La disposition géométrique du LHC est semblable à celle du LEP. Huit arcs de 2 460 m de long chacun sont séparés par huit sections droites. Les expériences sont installées dans les parties droites 1, 2, 5 et 8 où les faisceaux se croisent, tandis que les sections droites 3, 4, 6 et 7 sont réservées aux services propres à la machine (accélération, nettoyage interne des faisceaux, extraction vers les absorbeurs externes).

Les arcs sont reliés aux sections droites adjacentes par un ensemble de lentilles magnétiques et de dipôles appelé "suppresseur de dispersion" dont la fonction spécifique est d'adapter l'optique régulière des arcs aux optiques particulières des sections droites en suivant des trajectoires conformes à la géométrie du tunnel. Comme le montre le schéma d'ensemble de la machine (voir figure 2.4 à la page 25), une certaine symétrie est conservée. Les huit arcs sont identiques et formés chacun de 23 cellules, elles aussi identiques. Un ensemble de 23 cellules est appelé "maille" de la machine.

Une demi-cellule est un ensemble composé de trois dipôles de 14,2 m, chacun dans leur cryostat respectif, et d'un quadripôle de 3,10 m implanté dans un cryostat comportant différents éléments de correction et de mesure de la position du faisceau. Ce dernier ensemble s'appelle "section magnétique droite courte". La demi-cellule de base mesure 53,46 m et se reproduit identique à elle-même sur les 20 km d'arc (figure 2.7).

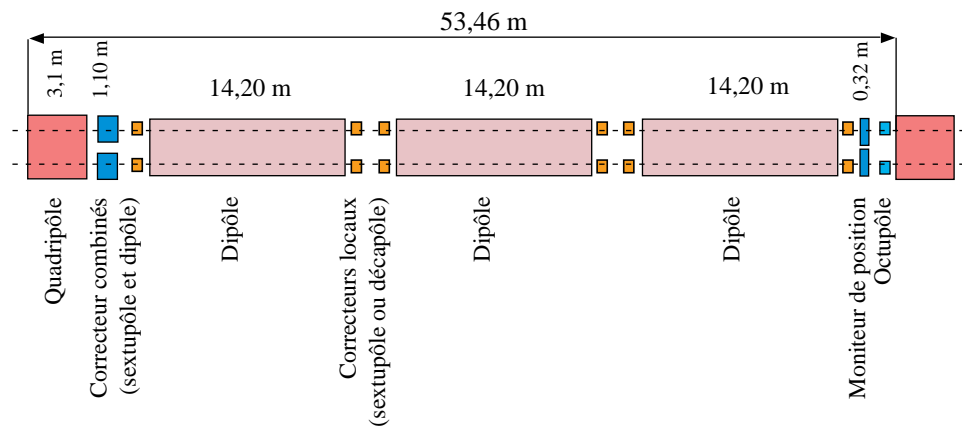


Figure 2.7

La demi-cellule de la machine LHC

A cela, il faut ajouter un cryostat de plus petit diamètre qui chemine à côté du cryostat principal et contient les lignes de distribution cryogénique reliées au cryostat principal à chaque section droite courte. Le photomontage (figure 2.8) montre bien cet ensemble.

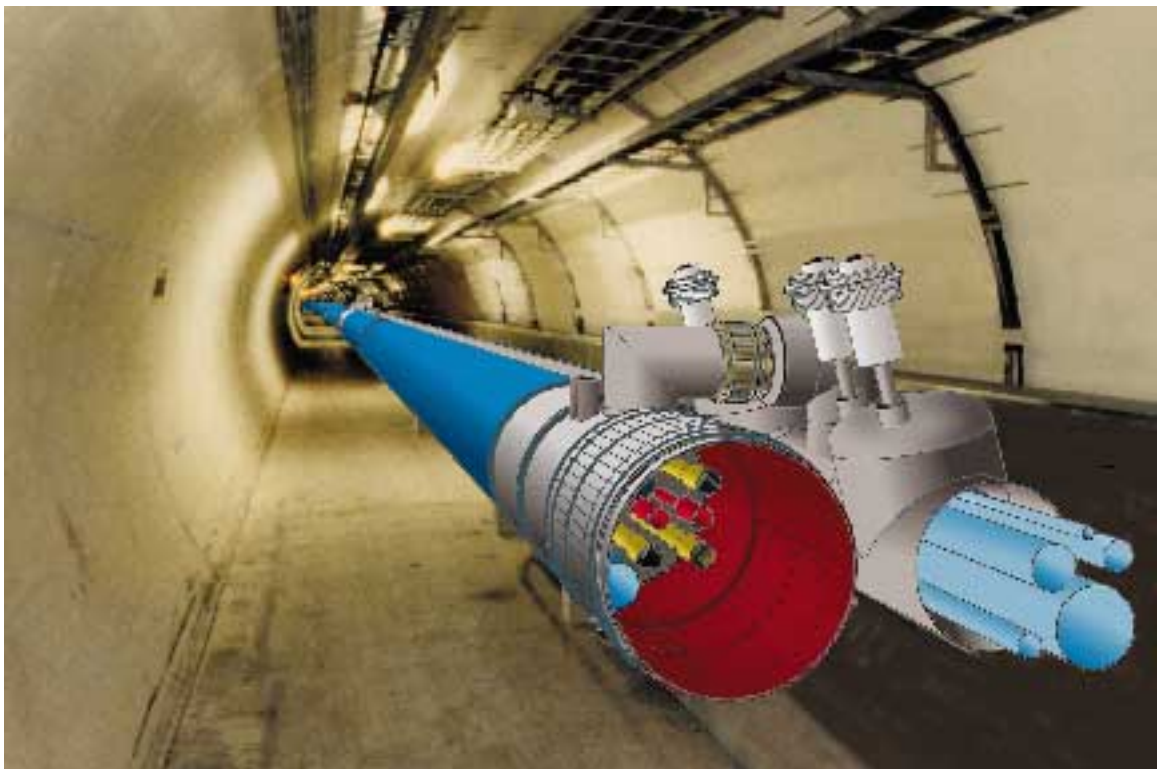


Figure 2.8

Le LHC dans le tunnel du LEP

2.2.3

Le guidage magnétique

2.2.3.1

Les aimants de courbure

Le guidage du faisceau, c'est-à-dire le suivi de la trajectoire quasi-circulaire dans l'anneau de 27 km, est assuré par 1 232 aimants de courbure, les dipôles, d'une longueur magnétique de 14,2 m. Ces dipôles sont placés dans les arcs. Il s'agit de dipôles "deux en un" : les deux faisceaux circulent en sens opposés, à 194 mm de distance l'un de l'autre, dans deux canaux magnétiques supraconducteurs situés dans la même culasse. La mise au point de cette solution originale a nécessité plusieurs années de travail en collaboration avec l'industrie européenne et la réalisation de nombreux prototypes.

Les bobines supraconductrices de 56 mm de diamètre intérieur sont formées de deux couches, intérieure et extérieure. Ces couches correspondent respectivement à 30 et 52 spires de câble supraconducteur dont la largeur est de 15 mm et l'épaisseur de 1,5 à 2 mm. Ce câble est lui-même formé de 28 (intérieur) et 32 (extérieur) brins de 1 mm de diamètre, chaque brin étant composé de 8 900 (intérieur) et 6 500 (extérieur) filaments d'un diamètre respectif de 7 et 6 μm . Le filament est constitué d'un alliage supraconducteur de Niobium-Titane (Nb-Ti) dans une matrice de cuivre (Cu). Cette matrice permet de "stabiliser" le supraconducteur en évacuant courant électrique et chaleur dissipée en cas de perturbations résistives.

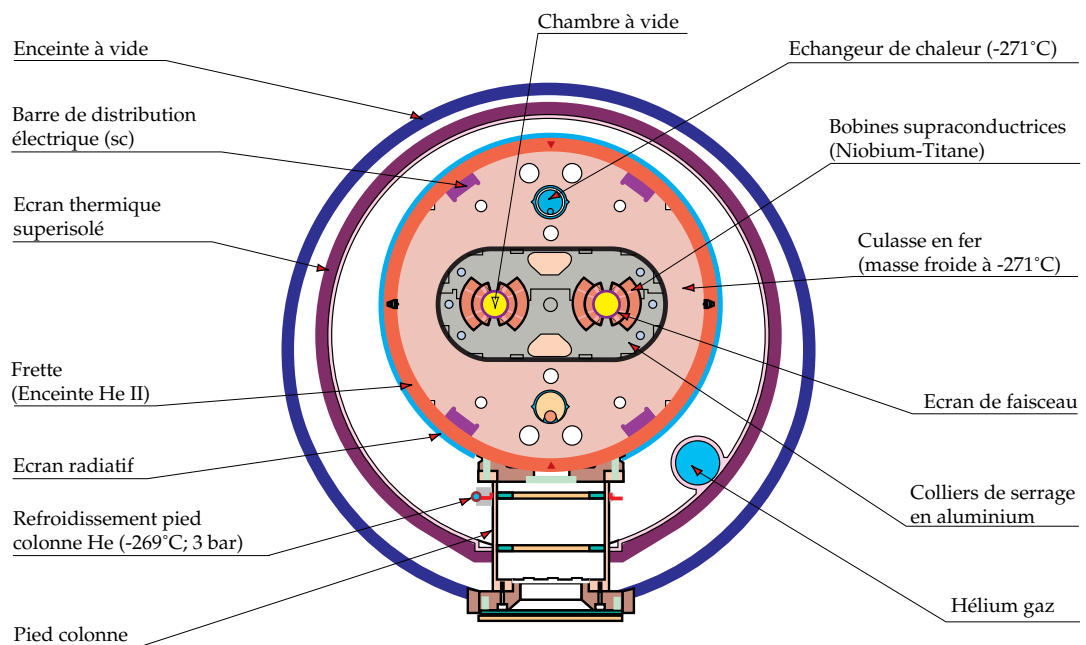


Figure 2.9

Coupe transversale d'un dipôle LHC

Les bobines, sur lesquelles s'exercent en fonctionnement des forces considérables, 300 tonnes par mètre linéaire transversalement et 50 tonnes longitudinalement à chaque extrémité, sont maintenues par des colliers de serrage non magnétiques en alliage d'aluminium qui forment un carcan continu sur toute leur longueur. Les colliers sont eux-mêmes enserrés dans la culasse magnétique d'un diamètre extérieur de 550 mm. L'ensemble est comprimé dans un cylindre d'acier soudé de 570 mm de diamètre. Une coupe transversale du dipôle illustre cette structure (figure 2.9).

Il s'agit là du cœur du projet, de sa partie technologiquement la plus innovante et la plus coûteuse. La qualité de ces éléments détermine le bon fonctionnement du LHC.

Le champ magnétique maximum prévu pour ce type d'aimant est très puissant : il est de 9 Tesla, soit environ 100 000 fois plus que le champ magnétique terrestre. Cependant, le champ opérationnel (nominal) est de 8,4 Tesla. Pour un aimant classique résistif, la qualité du champ magnétique est assurée par la précision de l'usinage des pôles magnétiques. Pour un aimant supraconducteur, c'est la géométrie des bobines, elles-mêmes soumises à d'énormes variations de contraintes thermiques et mécaniques, qui détermine les défauts des champs magnétiques. Ces défauts doivent rester très faibles afin que la zone des bons champs soit suffisante pour conserver la luminosité entre deux remplissages de la machine, tout en gardant aux bobines des dimensions raisonnables pour limiter la taille, donc le coût des aimants.

Le respect de tolérances très strictes pour une si grande quantité d'éléments, le contrôle permanent de la qualité de fabrication constituent le véritable défi du projet LHC. Cet ensemble (bobines, colliers, culasse, cylindre de compression) est appelé la masse froide puisqu'il est refroidi à 1,9 K. Il est monté dans un cryostat sous vide d'un diamètre extérieur de 914 mm, muni de différents écrans thermiques. Il pèse 28 tonnes.

2.2.3.2

Les quadripôles de focalisation

La dimension des faisceaux est gardée sous contrôle par un système de focalisation périodique formé de lentilles quadripolaires supraconductrices. Il y a 386 quadripôles dans les arcs et leurs prolongements, un par demi-cellule de base. Ils sont construits sur le principe adopté pour les dipôles, "deux en un", à la nuance près que les champs quadripolaires sont de même polarité dans les deux ouvertures. Le quadripôle est alors focalisant pour un faisceau et défocalisant pour l'autre faisceau de direction opposée ; cette focalisation alternée conduit à un montage dit asymétrique dans les longues sections droites.

Les quadripôles ont un gradient élevé (223 T/m), une longueur magnétique de 3,10 m et le même diamètre intérieur que les bobines des dipôles (56 mm). Ils utilisent le même câble que le câble extérieur des dipôles, chaque ouverture est formée de bobines à deux couches d'un total de 96 spires. Les bobines sont maintenues par des colliers en acier inoxydable et entourées d'une culasse

magnétique d'un diamètre extérieur de 456 mm. L'ensemble de la masse froide ainsi constitué est monté dans un cryostat de même diamètre que celui des dipôles (voir figure 2.11).

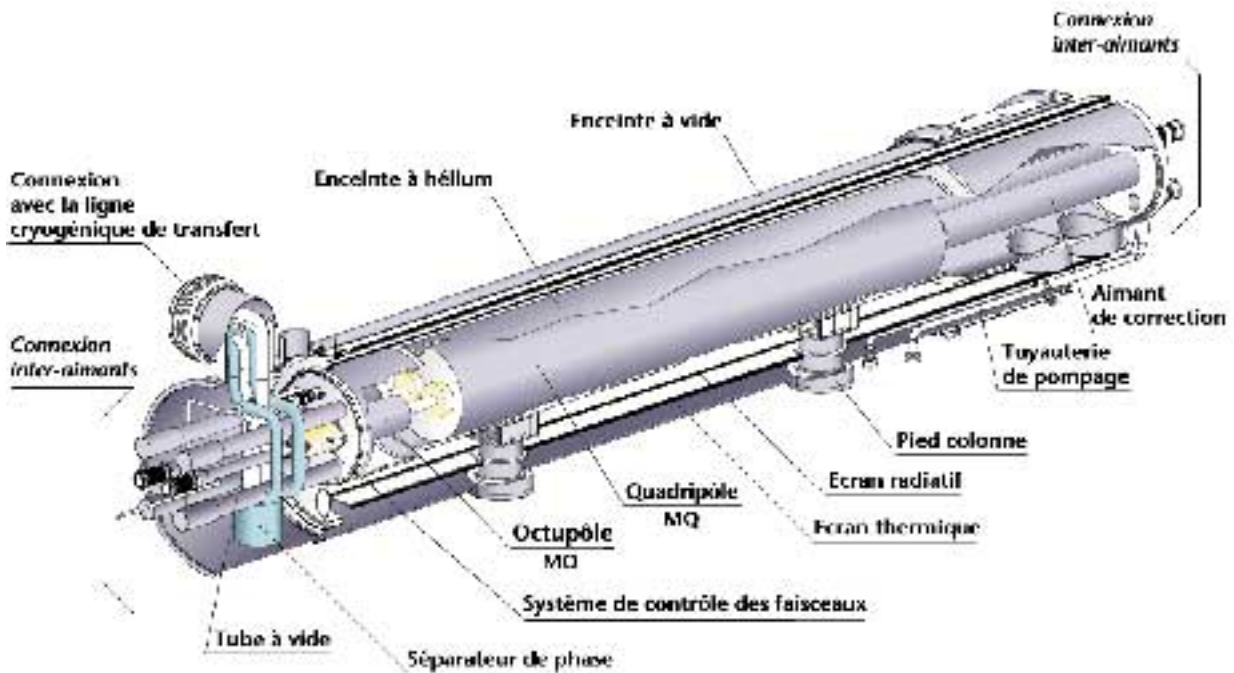


Figure 2.10

Section magnétique droite courte

2.2.3.3

Les autres aimants

En plus des grandes séries d'aimants de guidage et de focalisation formant la structure régulière de la machine dans les arcs, nous trouvons dans les parties droites longues du tunnel des ensembles magnétiques spécialisés. En effet, dans les lignes droites autour des Points 1, 2, 5 et 8 où sont logées les expériences, les faisceaux écartés de 194 mm par ailleurs doivent être rapprochés pour se croiser dans les détecteurs.

De part et d'autre des points de croisement sont installés deux ensembles formés de deux dipôles de recombinaison, l'un à deux ouvertures, l'autre à une ouverture commune aux deux faisceaux. Seize de ces gros aimants supraconducteurs sont prévus. Aux croisements, les faisceaux doivent être très fortement focalisés dans les deux plans transversaux. Cela est assuré par deux triplets de lentilles quadripolaires supraconductrices placés de part et d'autre des couples de dipôles de recombinaison.

Le triplet extérieur est fait de quadripôles à deux ouvertures semblables à ceux de l'arc, tandis que le triplet intérieur (plus près du point de croisement) est constitué de quadripôles à une ouverture de grand diamètre. Un total de 24 quadripôles de chaque type est prévu. Un tel ensemble s'appelle une section à faible bêta, bêta étant le paramètre qui représente la fonction de focalisation, analogue à l'enveloppe externe du faisceau de particules.

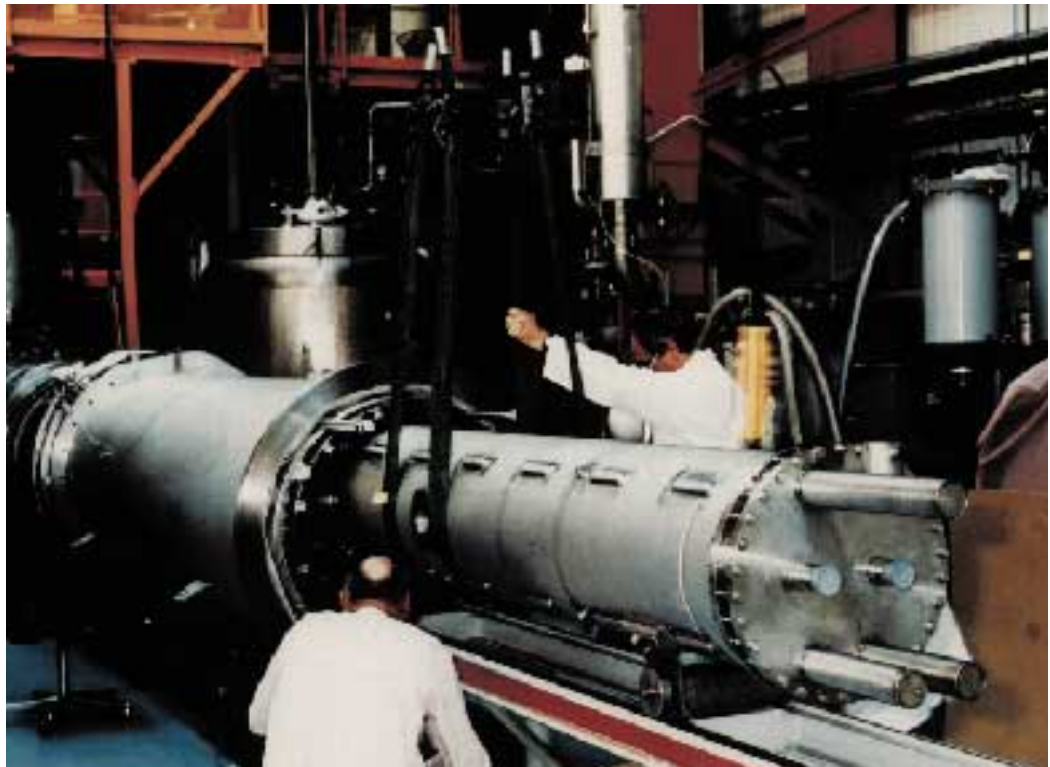


Figure 2.11

Montage du premier quadripôle LHC dans son cryostat de test à Saclay

De plus, dans les lignes droites 2 et 8 sont installés les aimants à septum et les déflecteurs rapides nécessaires à l'injection dans le LHC des protons pré-accélérés par le PS et le SPS. Les insertions techniques (les autres insertions) sont équipées d'aimants spécifiques, en partie résistifs pour les insertions de nettoyage de faisceau.

2.2.4

La cryogénie

La majeure partie des aimants du LHC est refroidie à 1,9 K et profite des propriétés thermophysiques de l'hélium superfluide (Hélium II), en particulier de sa capacité calorifique, de sa conductivité thermique et de sa faible viscosité.

La masse froide d'un aimant à 1,9 K est immergée dans un bain statique d'hélium superfluide pressurisé à 100 kPa (1 bar). La chaleur générée ou déposée dans les conducteurs est transportée par conduction thermique vers

un tube échangeur de chaleur dans lequel circule l'Hélium II saturé, c'est-à-dire en équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse, donc à température constante. Cet état d'équilibre est maintenu par pompage de l'hélium gazeux froid (voir figure 2.12).

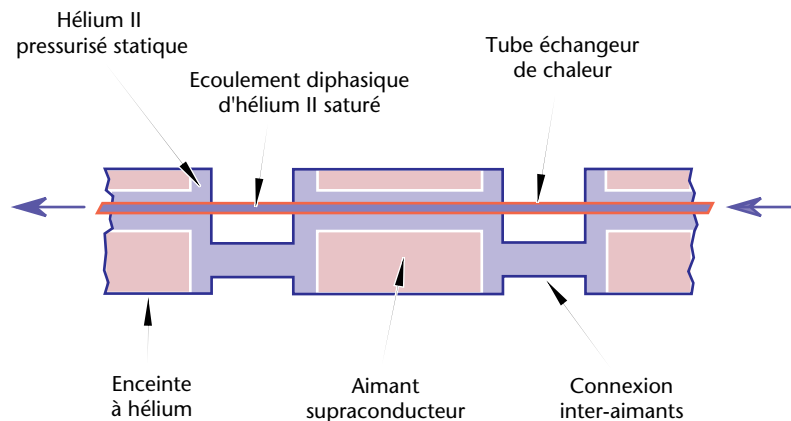


Figure 2.12

Principe du refroidissement des aimants du LHC

Chaque demi-cellule est alimentée en fluide cryogénique à la hauteur de la section droite par une ligne de distribution séparée du cryostat principal des aimants. Cette ligne est alimentée depuis les quatre points d'accès pairs ¹ pour bénéficier des installations cryogéniques du LEP, qui doivent être agrandies. En surface se situent les dispositifs de stockage et les compresseurs qui alimentent les réfrigérateurs. Des lignes cryogéniques de transfert utilisent les puits existants pour descendre l'hélium liquéfié dans les cavernes au niveau du tunnel où sont situés les compresseurs froids. De ces installations cryogéniques partent de chaque côté les lignes de distribution qui desservent chacune un secteur du LHC (voir figure 2.14 à la page 38).

Les principaux éléments de l'équipement de ces halles souterraines sont les compresseurs froids qui permettent d'abaisser la température de 4,5 K à 1,8 K (figure 2.13 à la page 37). Ils comportent plusieurs étages de compresseurs centrifuges en série et requièrent des développements spécifiques, réalisés avec l'industrie ainsi que dans le cadre d'accords de collaboration avec le CEA en France.

L'avantage de la solution retenue est de libérer les points impairs de toute nécessité d'installation cryogénique, mis à part un stockage d'hélium à utiliser en cas de transition résistive généralisée d'un secteur entier de la machine.

1. Une exception : le secteur 1-2 est alimenté depuis le Point 1.8 alors que le secteur 2-3 est alimenté depuis le Point 2.

Un circuit d'hélium à température intermédiaire est nécessaire pour refroidir les écrans thermiques (entre 50 K et 75 K). Une distribution d'hélium supercritique à 4,5 K est utilisée pour le pré-refroidissement et le remplissage de la machine, ainsi que pour le refroidissement des écrans de faisceau.

En cas de défectuosité technique résultant d'échauffements locaux, la supra-conductivité se perd (transitions résistives) et l'hélium liquide est vaporisé. Un système de récupération d'hélium est alors mis en œuvre et fonctionne en relation avec le système général de protection, qui évacue l'énergie électrique stockée dans les aimants sans dommage pour eux.



Figure 2.13

Compresseurs d'un réfrigérateur d'hélium du LEP

2.2.5

Le vide

Les protons du LHC circulent à une vitesse très proche de celle de la lumière (300 000 km/s). A chaque seconde, ils font 11 250 fois le tour de la machine et cela pendant une vingtaine d'heures. Ils parcourent ainsi des distances astronomiques. Ces très longs parcours ne sont possibles que dans un vide très poussé (environ un dix milliardième de la pression atmosphérique) ; il s'agit d'éviter que les protons ne quittent leur orbite à la suite de collisions avec les molécules de gaz résiduels présentes dans la chambre à vide où ils circulent.

Ce vide quasi spatial est également imposé par la présence de la bobine supraconductrice refroidie à 1,9 K. En effet, les protons qui quittent la chambre à vide (voir figure 2.15 à la page 39) viennent déposer dans cette bobine une faible quantité d'énergie. Or, il faut impérativement limiter ce dépôt pour éviter un réchauffement local, car celui-ci aboutit inévitablement à une perte de l'état supraconducteur et entraîne l'arrêt de la machine.

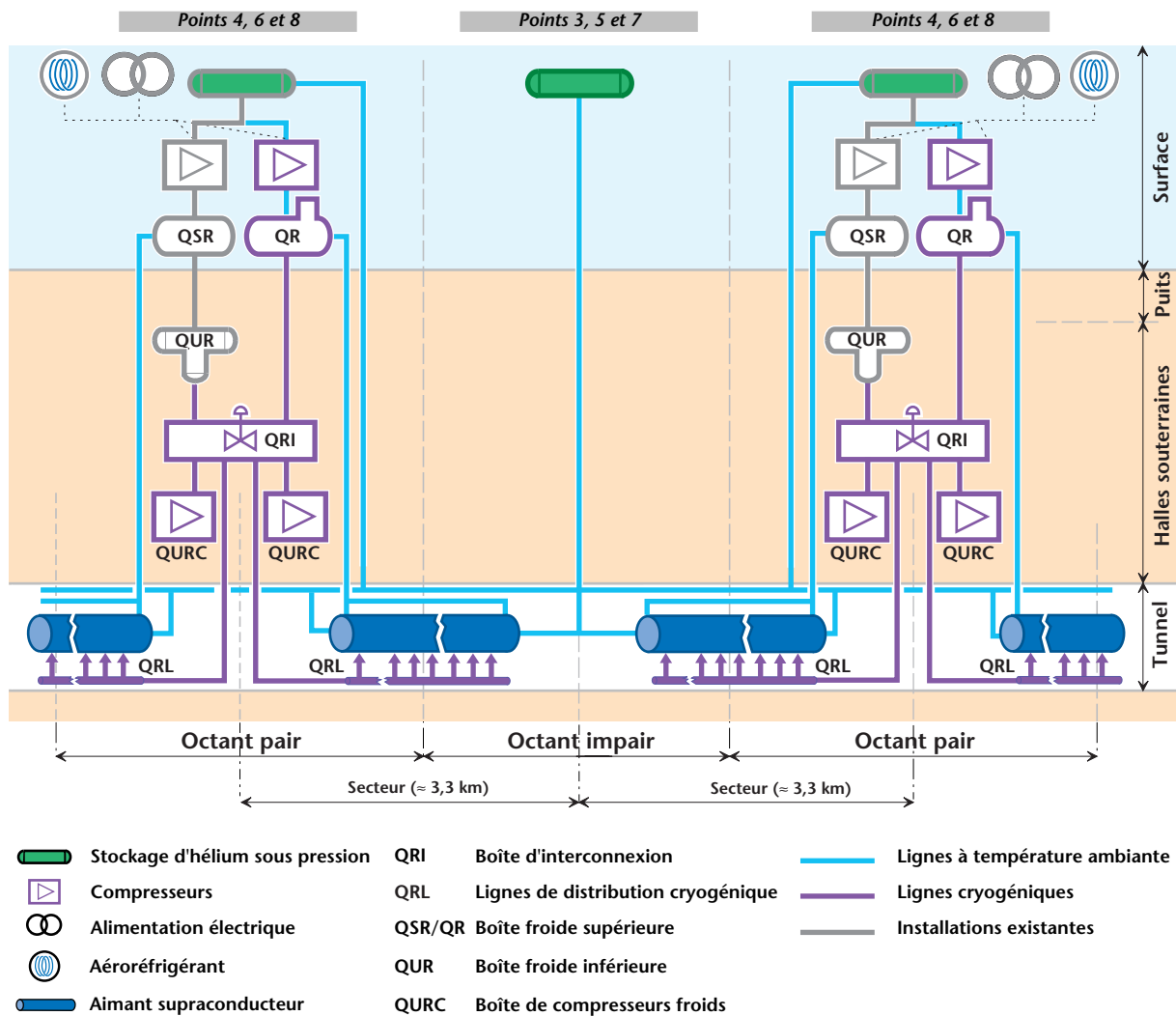


Figure 2.14

Architecture générale de la cryogénie du LHC

Le vide poussé est obtenu à partir d'un vide primaire par le "collage" des molécules de gaz résiduel sur les parois très froides, puisque proches du zéro absolu, de la chambre à vide. Pour éviter la désorption des molécules "collées" à la paroi métallique de l'enceinte à vide sous l'effet du rayonnement synchrotronique, celui-ci doit être intercepté.

La solution consiste à introduire un écran de faisceau perforé et refroidi à 20 K entre le faisceau et la chambre à vide, refroidie elle à 1,9 K. L'écran de faisceau, en acier cuivré, absorbe le rayonnement synchrotronique et les molécules désorbées sont piégées dans la paroi froide à 1,9 K. Toute l'attention est portée sur la mécanique et les tolérances d'alignement de cet écran dans la chambre à vide, sur des longueurs de 15 m.



Figure 2.15

Ecorché de la chambre à vide du LHC

2.2.6

Le système d'accélération

Dans un accélérateur collisionneur comme le LHC, le système haute fréquence a pour fonction non seulement d'accélérer les protons de 450 GeV à 7 TeV, mais aussi d'assurer en permanence le groupement des particules en paquets courts (quelques centimètres) nécessaires à l'obtention d'une luminosité élevée.

La fréquence de fonctionnement du système haute fréquence (400 MHz) est déterminée par celle de l'injecteur, en l'occurrence le SPS. En effet, celui-ci délivre des trains de paquets, (la séparation entre les paquets est un multiple de 5 nanosecondes), qui doivent s'engrener dans les zones stables longitudinales créées toutes les 2,5 nanosecondes par le système haute fréquence du LHC. Les dimensions transversales des cavités accélératrices résonnant à 400 MHz sont incompatibles avec la séparation normale des faisceaux (194 mm). Aussi a-t-on prévu, au Point 4, une zone qui accueille l'ensemble des systèmes haute

fréquence du LHC et dont la séparation des faisceaux a été augmentée jusqu'à 420 mm.

Les cavités haute fréquence du LHC sont caractérisées par leur forte énergie emmagasinée, nécessaire à l'absorption des à-coups produits par la structure temporelle du faisceau de haute intensité. L'emploi de cavités supraconductrices monocellules, dont la technologie est directement dérivée de celle mise en œuvre au LEP, satisfait tous les critères.

Bien que la puissance réelle communiquée aux faisceaux soit relativement modeste à cause d'une montée en énergie lente et d'un rayonnement synchrotron faible (comparé à celui des électrons du LEP), il est nécessaire de prévoir l'installation d'une puissance haute fréquence suffisante pour manipuler des faisceaux de haute intensité en toute sécurité. On utilise donc des klystrons de haute puissance (quelques centaines de kilowatts) qui alimentent les cavités par l'intermédiaire de guides d'ondes, de circulateurs et enfin de coupleurs de puissance de haute performance conçus, eux aussi, d'après l'expérience acquise au LEP.

Les faisceaux du LHC, avec leur très grand nombre de paquets, peuvent être sujets à des instabilités de paquets couplés, provoquées soit par des impédances parasites à bande étroite, soit par la résistivité de la chambre à vide dans le plan transversal.

Pour supprimer ces instabilités, mais aussi pour réduire l'effet des inévitables oscillations à l'injection et préserver ainsi la luminosité de la machine, on a prévu des systèmes de contre-réaction dans le plan longitudinal et dans les deux plans transversaux. Le système détecte les oscillations éventuelles de chaque paquet et les signaux correspondants sont traités, amplifiés et appliqués avec la phase convenable sur le paquet instable. Pour ce faire, on utilise sur l'axe longitudinal des cavités classiques en cuivre, fortement couplées au générateur haute fréquence (tétrode) afin d'obtenir une bande large et, dans le plan transversal, des déflecteurs électrostatiques, eux aussi directement couplés à des tétrodes de puissance.

2.2.7

Arrêt, extraction et absorption des faisceaux

Le but du système d'extraction et d'absorption des faisceaux est de sortir les faisceaux de l'anneau rapidement et de manière sûre. Cette opération de décharge peut intervenir soit à la fin de chaque cycle de stockage ou d'étude, soit en cas de dysfonctionnement d'éléments vitaux de l'accélérateur comme les aimants supraconducteurs.

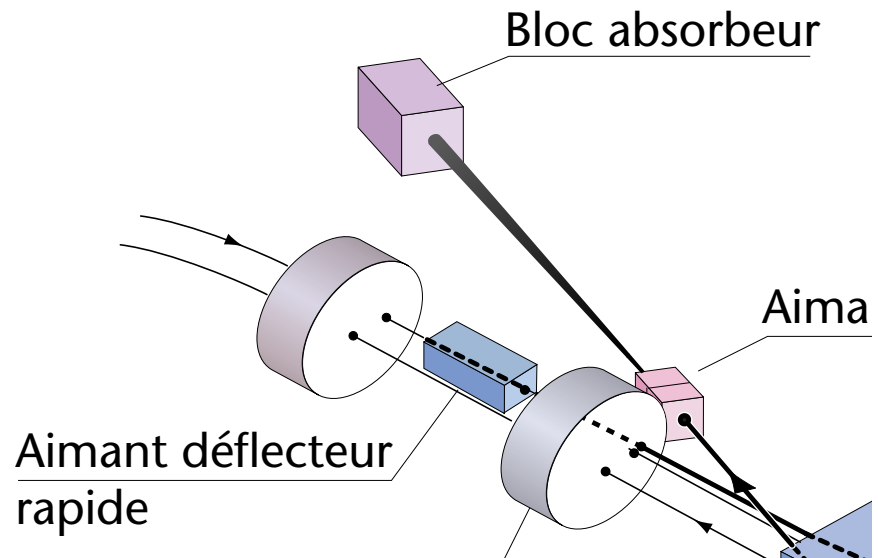


Figure 2.16

Configuration du système d'arrêt de faisceau au Point 6

Chacun des deux anneaux a son propre système d'absorption indépendant, et ces deux systèmes sont installés symétriquement de part et d'autre du Point 6.

Le système d'arrêt des faisceaux est un système d'extraction rapide sur un seul tour. Il permet de sortir les faisceaux des anneaux quelques millièmes de seconde à peine après le déclenchement de la commande d'arrêt, soit par un opérateur, soit automatiquement par les appareils de contrôle surveillant en permanence l'état des faisceaux et des divers sous-systèmes de l'accélérateur. Ce système d'arrêt consiste en une série d'aimants de déflexion qui dirige le faisceau sur le bloc absorbeur situé à 750 m. Le transit entre les aimants de déflexion et le bloc extérieur s'effectue à l'intérieur d'une chambre à vide (voir figure 2.16 à la page 41).

Afin d'éviter un échauffement local excessif et instantané du bloc absorbeur, un couple d'aimants orthogonaux produit une dilution du faisceau. La figure 2.17 montre schématiquement comment est construit un bloc absorbeur. Les matériaux et les dimensions du bloc sont choisis de manière à contenir la chaleur et les radiations induites. Le noyau central en graphite, où les températures les plus hautes sont atteintes, absorbe la plus grande partie de l'énergie du faisceau. Ce noyau est lui-même entouré d'une enveloppe en aluminium et d'un blindage en fer massif.

Le poids total d'un bloc absorbeur est de 800 tonnes. Le noyau et son enveloppe d'aluminium sont solidaires et correspondent à une pièce de 14 tonnes ; le blindage en acier est découpé en blocs de 25 tonnes.

Pour réduire le temps nécessaire au refroidissement du noyau central, une plaque d'aluminium refroidie à l'eau est insérée dans l'assemblage du bloc ; l'eau

de refroidissement y circule en circuit fermé. Chaque absorbeur de faisceau est logé dans une halle souterraine située au bout d'un tunnel tangentiel au tunnel principal du LHC (voir paragraphe 4.1.2, page 88).

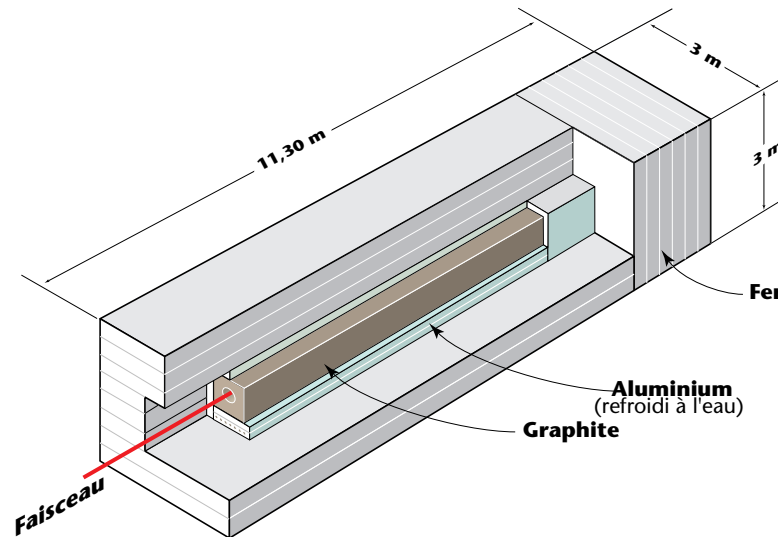


Figure 2.17

Principe de construction des blocs absorbeurs de faisceaux

2.2.8

L'alimentation électrique

Le LHC est alimenté en électricité à partir du réseau français par la ligne à haute tension de 400 kV en provenance du barrage de Génissiat et aboutissant à la sous-station du site de Prévessin. Le LHC réutilise intégralement le réseau de distribution du LEP. Toutefois, des modifications doivent y être apportées, notamment aux Points 1 et 5 où l'installation des expériences ATLAS et CMS crée de nouveaux besoins.

Les systèmes haute fréquence du LEP, alimentés à partir des points pairs, nécessitaient une énergie importante. Etant donné que la conception de la machine LHC repose largement sur la supraconductivité, elle fait donc pratiquement disparaître cette contrainte du réseau de distribution électrique. En revanche, les systèmes cryogéniques sont très importants. Par conséquent, un gros travail de câblage et de re-routage moyenne tension est nécessaire, même si la majeure partie des installations de haute tension est réutilisée.

La future zone d'expérimentation du Point 5 n'est pas équipée d'une sous-station 66 kV. Etant donné que le détecteur OPAL actuellement installé au Point 6 est démonté, le système de distribution du Point 6 suffit pour alimenter à la fois le Point 5 et le Point 6. L'accélérateur ainsi que les installations de l'expérience CMS au Point 5 sont alimentés par une ligne 18 kV additionnelle reliant les Points 5 et 6 entre eux.

Pour améliorer l'interconnexion des différents sites du Laboratoire, la construction d'une nouvelle ligne 66 kV est prévue entre le site de Préveessin et le Point 1. Ce dernier devient ainsi un nœud important du réseau, desservant aussi bien le LHC lui-même que l'expérience ATLAS et contribuant à une amélioration globale de la fiabilité de l'ensemble du réseau du CERN.

Les nouvelles liaisons haute tension sont enterrées dans des tranchées prévues à cet effet (ligne 66 kV) ou installées dans des passages de câbles existants (ligne 18 kV).

Les deux tunnels de transfert reliant le LHC au SPS nécessitent des installations électriques puissantes pour alimenter leur système de guidage magnétique fonctionnant à température ambiante. Les installations électriques de ces deux tunnels de transfert sont logées dans des bâtiments existants du SPS et du LEP.

2.2.9

Le refroidissement des éléments non-supraconducteurs

Pour son refroidissement par eau, le LHC utilise l'infrastructure existante. Aucune ressource supplémentaire en eau brute n'est requise.

Nous avons vu que la plus grande partie des composants du LHC fait appel à la supraconductivité, qui implique un refroidissement à très basse température obtenu par l'utilisation d'hélium liquide. Un refroidissement conventionnel par circulation d'eau froide est utilisé pour d'autres composants, comme les compresseurs ou l'électronique. Dans ce cas, l'eau de refroidissement est prise sur le circuit existant du SPS après passage dans un échangeur atmosphérique et avant son rejet dans le Nant d'Avril en Suisse.

L'eau brute récupérée depuis le SPS alimente aujourd'hui les installations du LEP et alimentera demain celles du LHC. Elle circule en circuit quasi-fermé et des stations aéroréfrigérantes existantes, installées aux Points 2, 4, 6 et 8, assurent son refroidissement. Une petite quantité d'eau brute est utilisée pour compenser l'évaporation et déconcentrer l'eau des bassins de ruissellement.

L'eau du SPS provient directement du lac Léman depuis la station de pompage du Vengeron, par une canalisation à fort débit ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) construite spécialement au début des années soixante-dix. La figure 2.18 à la page 44 montre la circulation de l'eau depuis le lac Léman jusqu'au Nant d'Avril. La description détaillée de ces installations est présentée dans l'Annexe technique n° 2, "Rapport définitif de sûreté du LEP".

Pour chacun des détecteurs ATLAS et CMS, installés aux Points 1 et 5, une station aéroréfrigérante supplémentaire d'une puissance de refroidissement de 10 MW est prévue. La station aéroréfrigérante de l'expérience ATLAS est installée au Point 1.8.

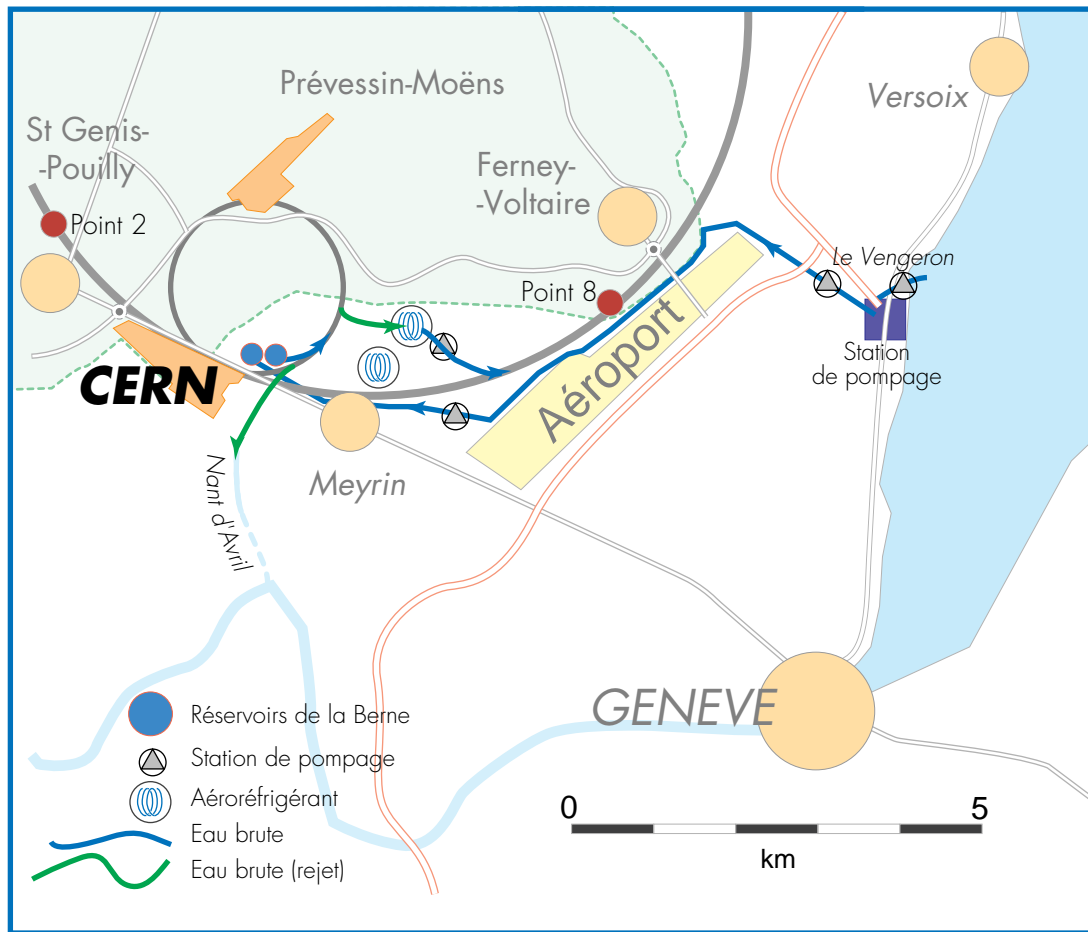


Figure 2.18

Alimentation du CERN en eau de refroidissement

2.2.10

La ventilation du tunnel

Le système de ventilation des installations a pour but de maintenir la température et l'humidité de l'air à des valeurs stables tout en assurant le renouvellement régulier de l'air.

Le LHC étant installé dans les mêmes ouvrages souterrains que le LEP, le système de ventilation actuel est entièrement maintenu. Les circuits de ventilation se composent de quatre sous-ensembles indépendants :

- la ventilation du tunnel de la machine
- la ventilation des zones d'expérience
- la ventilation des zones techniques
- la pressurisation des zones de sécurité.

En ce qui concerne le tunnel, l'air est aspiré de l'extérieur aux points pairs et pulsé à travers le tunnel pour en être extrait aux points impairs (voir figure 2.19 à la page 45).

L'air pulsé est asséché et sa température stabilisée à 19 degrés Celsius. Les cages d'escaliers et d'ascenseurs dans les puits accessibles au personnel sont dotées de sas en surface et au tréfonds afin d'être maintenues en légère surpression pour des raisons de sécurité.

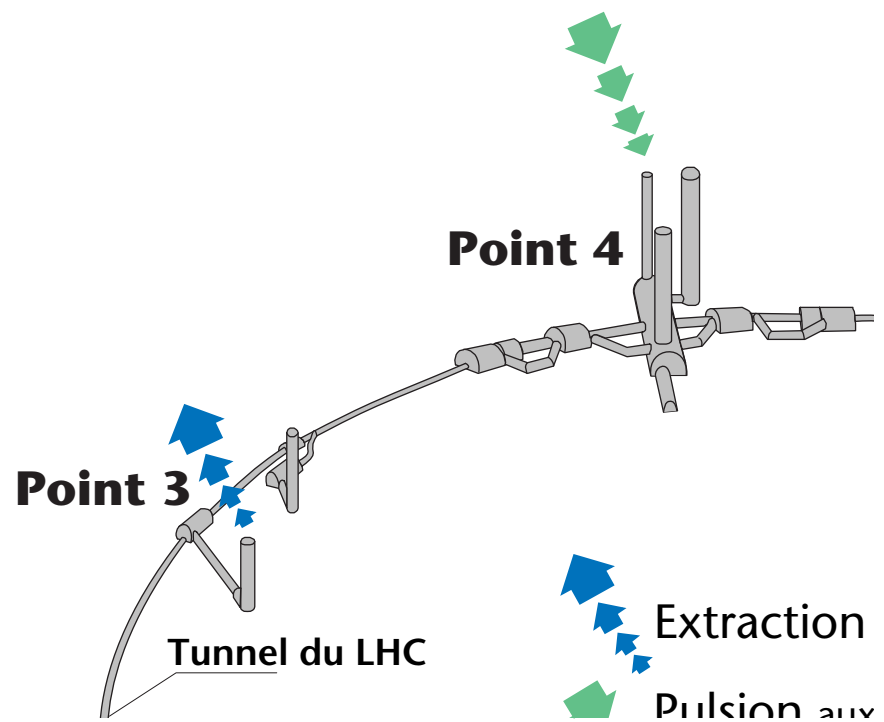


Figure 2.19

Ventilation du tunnel LEP/LHC

Quelques installations supplémentaires sont nécessaires, pour assurer la ventilation des nouvelles zones souterraines (zones d'expérimentation aux Points 1 et 5, tunnels de liaison et tunnels des arrêts de faisceaux). Ces installations sont réalisées suivant les mêmes principes que les installations actuelles.

2.2.11

Le pilotage de la machine

L'accélérateur LHC doit être configuré très précisément pour fonctionner avec l'efficacité optimum dont ses utilisateurs, les chercheurs, ont besoin pour leurs expériences. L'accélérateur est donc commandé en continu, et les configurations nombreuses et importantes définissant son mode de fonctionnement doivent être fréquemment modifiées et ajustées.

Comme pour les accélérateurs précédents, notamment le LEP, un système de commande informatisé est mis en place. Des ordinateurs reliés entre eux par un réseau en fibres optiques sont ainsi spécialement installés dans le tunnel, dans les bâtiments de surface sur les différents sites du LHC et dans la salle de contrôle centrale. En outre, le développement de tous les programmes correspondants est assuré afin que la machine fonctionne de la manière la plus fiable. Ces programmes sont actualisés au fur et à mesure de l'évolution des besoins des expérimentateurs.



Figure 2.20

Une salle de commande des accélérateurs du CERN

2.2.12

Le positionnement des éléments de la machine

La géométrie des accélérateurs de particules est strictement définie par le système de confinement magnétique des particules, dont les paramètres déterminent très précisément la trajectoire de chaque faisceau à l'intérieur de la chambre à vide. Pour contenir ces trajectoires dans les marges étroites de variation laissées par le faible diamètre du passage, il est primordial que les composants magnétiques de la machine soient positionnés avec une grande précision et que leurs éventuels mouvements dans le temps soient mesurés puis corrigés. La précision de l'alignement doit être de l'ordre d' $1/10$ de millimètre. Sur de telles dimensions, des mesures aussi précises relèvent des techniques de la géodésie (mesure de la Terre) et de la métrologie de position, avec des instruments et méthodes spécialement développés pour cet usage.

2.2.12.1**Géodésie de surface**

Un réseau géodésique avait été constitué pour le LEP, et mesuré à l'aide d'un distancemètre à deux lasers (précision : 1 mm à 10 km). Les points en sont matérialisés par des piliers en béton, dont la plupart sont stables et réutilisables, et il ne devrait pas être nécessaire d'en créer de nouveaux pour le projet LHC.

Sur les nouveaux chantiers, de simples bornes peuvent matérialiser les points au sol utilisables pour le génie civil. D'autre part, la mesure des réseaux géodésiques se fait maintenant à l'aide du système de satellites GPS ¹ d'une manière dite "différentielle".

Bien que ces satellites gravitent à 20 000 km de la Terre, ils servent à déterminer la position des points avec seulement quelques millimètres d'incertitude. L'intervisibilité entre points n'est plus indispensable, et de tels moyens évitent de construire sur les reliefs du site de nouveaux piliers qui déparent l'environnement.

2.2.12.2**Métrologie du collisionneur LHC**

Pour ne pas perdre le bénéfice des connaissances de la géométrie précise du LEP, des points auxiliaires décalés sont déterminés avant le démontage de cette machine, tout autour de l'anneau.

Une mesure de contrôle est ensuite effectuée sur ces seuls points, et cela constitue le réseau métrologique de référence valable pour l'ensemble du montage du LHC. Les tracés au sol, ainsi que le préalignement des composants, sont faits à partir de ce référentiel.

Pour le réglage ultime de la position radiale et verticale des éléments de la machine, un ensemble de mesures de haute précision permet de déterminer les derniers mouvements de correction des irrégularités dans une opération dite de "lissage final", qui réduit les écarts à une erreur moyenne de un dixième de millimètre.

De part et d'autre des expériences, les derniers réglages doivent être encore meilleurs, et des systèmes automatiques contrôlent les infimes mouvements pouvant affecter la précision des collisions de particules au cœur des gigantesques détecteurs. Les expériences auront aussi demandé des étalonnages et des mises en places précises de leurs éléments de détection, qui déterminent la position des particules les traversant. Tout cela est l'objet d'une métrologie très spéciale utilisant des instruments particuliers, dont certains ont été développés au CERN.

1. GPS : Global Positioning System ou Système de positionnement global

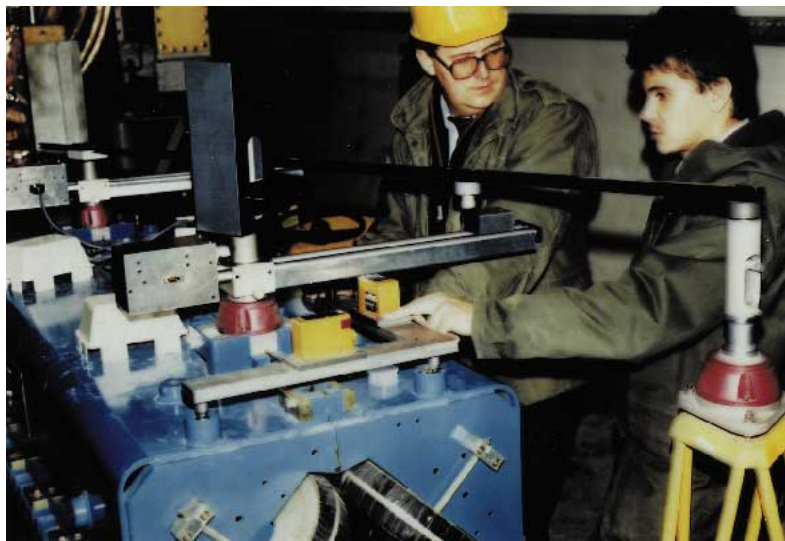


Figure 2.21

Alignement au dixième de millimètre d'un aimant quadripolaire du LEP

2.3

Coût et planning

2.3.1

Coût du projet

L'estimation du coût d'un grand projet est le fruit d'un intense travail de préparation tant pour les choix techniques que pour l'optimisation des processus de fabrication industrielle. Les travaux de recherche et développement du LHC, menés de concert avec l'industrie européenne, ont commencé il y a 10 ans et représentent près de 1 000 hommes-années d'efforts techniques consacrés à la mise au point du projet. Les coûts annoncés ont été vérifiés par des commissions d'experts internationaux. Ils doivent leur crédibilité à la grande expérience des ingénieurs du CERN qui ont démontré, par le passé, la fiabilité de leurs estimations.

Le coût du projet se divise en deux grandes masses budgétaires correspondant à la construction de l'accélérateur d'une part et des détecteurs pour les expériences d'autre part. Traditionnellement, le financement de l'accélérateur était entièrement à la charge du CERN, alors que les universités et les instituts avec lesquels le CERN collabore prenaient en charge la plus grande partie du financement et de la construction des détecteurs.

Dans le cas du LHC, les deux Etats-hôtes, la France et la Suisse, qui bénéficient des retombées économiques de proximité, ont accepté de verser une contribution spéciale pour la construction de l'accélérateur. En outre, certains pays non membres de l'Organisation dont les chercheurs participeront au

programme de recherche du LHC (Etats-Unis, Canada, Russie, Japon, Inde, etc.), ont également accepté de contribuer à la réalisation de l'accélérateur. Ces contributions exceptionnelles, et bien qu'elles ne soient pas encore toutes entièrement formalisées, représentent entre un quart et un cinquième du coût de la machine.

Pour les détecteurs, les proportions sont inversées : la contribution du CERN représente environ un cinquième du coût total ; celle des universités et instituts associés en couvre les quatre autres cinquièmes.

Exprimé en francs français au taux de change de novembre 1996, le coût pour le CERN du projet LHC se décompose comme suit :

Tableau 2.2

Coût du projet LHC pour le CERN (en millions de FRF)

Accélérateur	9 120
Zones d'expérimentation	1 000
Détecteurs	900
Total	11 020

Aux coûts mentionnés dans le tableau 2.2, qui représentent les frais d'investissement, vient s'ajouter le coût du personnel directement impliqué dans le projet, soit environ 7 500 hommes-années. La répartition du coût par grande famille d'activité est donnée dans la figure 2.22 à la page 50.

2.3.2

Planning général prévisionnel

Le planning général d'un grand projet est toujours révélateur de l'indispensable optimisation entre les contraintes financières et techniques qui s'exercent sur lui. Dans le cas du LHC, le planning a beaucoup évolué depuis l'approbation du projet en décembre 1994.

En raison des contraintes budgétaires, il était au départ prévu de réaliser le projet en deux étapes, avec un fonctionnement de la machine aux deux tiers de sa capacité dès 2004 et une finition progressive pour arriver à l'énergie maximale en 2008. Cette approche mettait rapidement à la disposition des physiciens un outil de recherche déjà valable, tout en étalant son financement dans le temps.

Avec l'assurance de contributions substantielles d'Etats non membres de l'Organisation, il est maintenant possible de réaliser le projet d'une seule traite, avec un début d'exploitation à pleine énergie dans la deuxième moitié de 2005, et pour un coût total moindre.

Coûts du LHC pour le CERN = 11 020 MRF

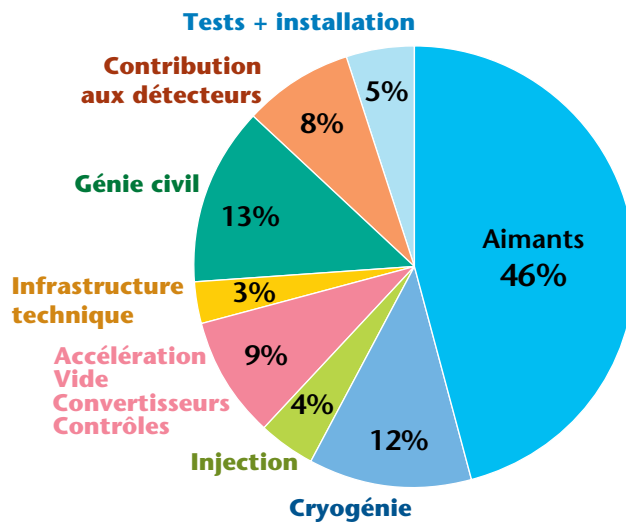


Figure 2.22

Répartition des coûts du LHC pour le CERN par grande famille d'activité

Si la réutilisation de l'infrastructure du LEP est un atout majeur pour le LHC, elle entraîne des contraintes importantes pour le planning. En effet, le LEP est une machine particulièrement sensible, capable de détecter des mouvements de terrains aussi infimes que ceux provoqués par les marées terrestres induites par la lune. Il faut donc éviter, pendant le fonctionnement du LEP, des travaux qui risqueraient de trop perturber la machine. Or il est prévu que le LEP fonctionne jusqu'à la fin de 1999 et une année supplémentaire de fonctionnement jusqu'à l'automne de l'an 2000 n'est pas exclue. Les travaux de génie civil du LHC doivent être compatibles avec cette contrainte. Par conséquent, le creusement des halles souterraines se fera de sorte à n'interférer avec le tunnel LEP que vers la fin de l'an 2000.

La figure 2.23 à la page 51 donne les grandes lignes du planning tant pour les travaux de génie civil que pour la construction de l'accélérateur et des détecteurs.

Les travaux de génie civil¹ doivent débuter au printemps 1998 par la préparation des zones en surface autour des puits, principalement au Point 5 à Cessy (France) et au Point 1 à Meyrin (Suisse), suivie par la construction des bâtiments ne coiffant pas de puits.

Avant d'entamer les travaux d'excavation à Cessy, il faudra sans doute procéder à la congélation du sol pour isoler le chantier d'excavation des puits de la nappe aquifère souterraine (voir paragraphe 5.1.5.1, page 140).

1. Voir figure 2.23

A Meyrin, le creusement des puits ne démarre qu'au printemps 1999. Les tunnels de transfert TI 2 et TI 8 n'interfèrent qu'à leurs extrémités avec les tunnels du LEP et du SPS. Leur creusement débute au printemps 1998 et la jonction avec le tunnel du LEP doit se faire dès le début de l'année 2001.

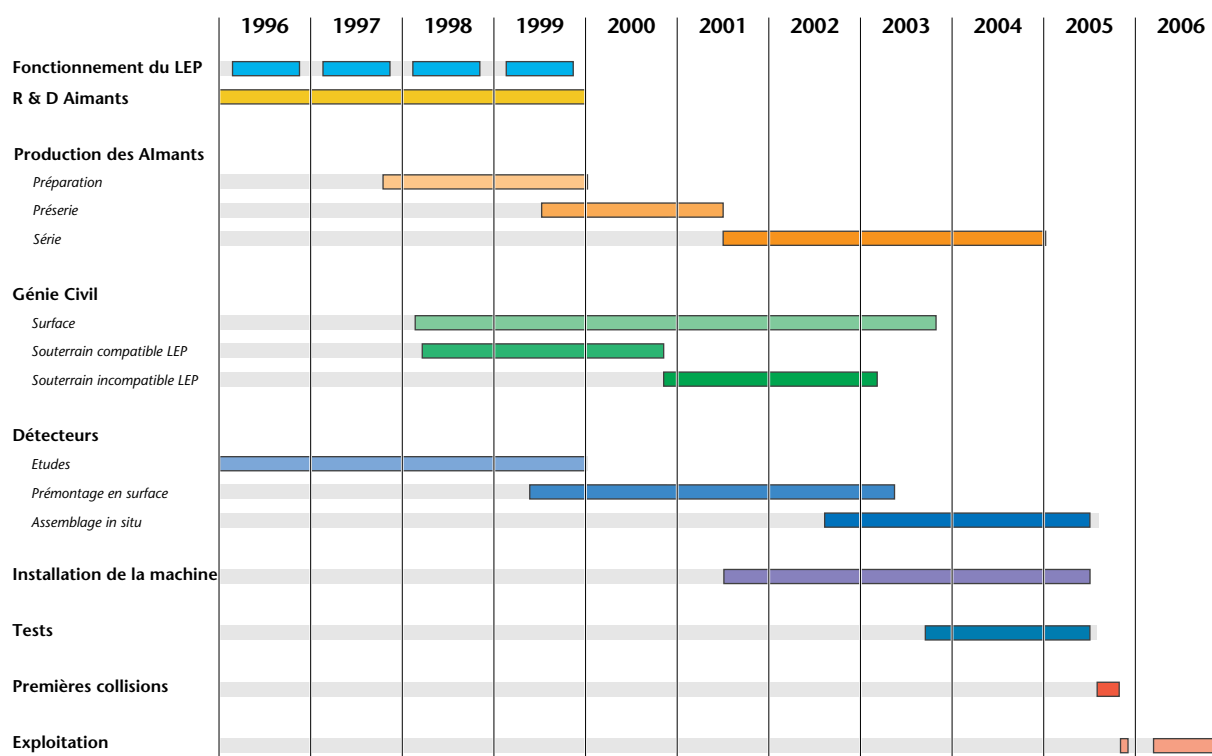


Figure 2.23

Planning général des travaux de construction du LHC

Une autre contrainte importante pour le planning tient au souci de minimiser le temps mort que représente pour la physique la période entre l'arrêt du LEP et le début de l'exploitation du LHC. Ce temps mort peut être réduit en assemblant de grandes parties des détecteurs en surface, et en réunissant ensuite les morceaux préfabriqués dans la halle souterraine associée à chaque expérience dès qu'elle est prête. L'assemblage en surface se fait alors en parallèle avec la construction de la halle souterraine.

2 - Description du projet LHC : l'accélérateur

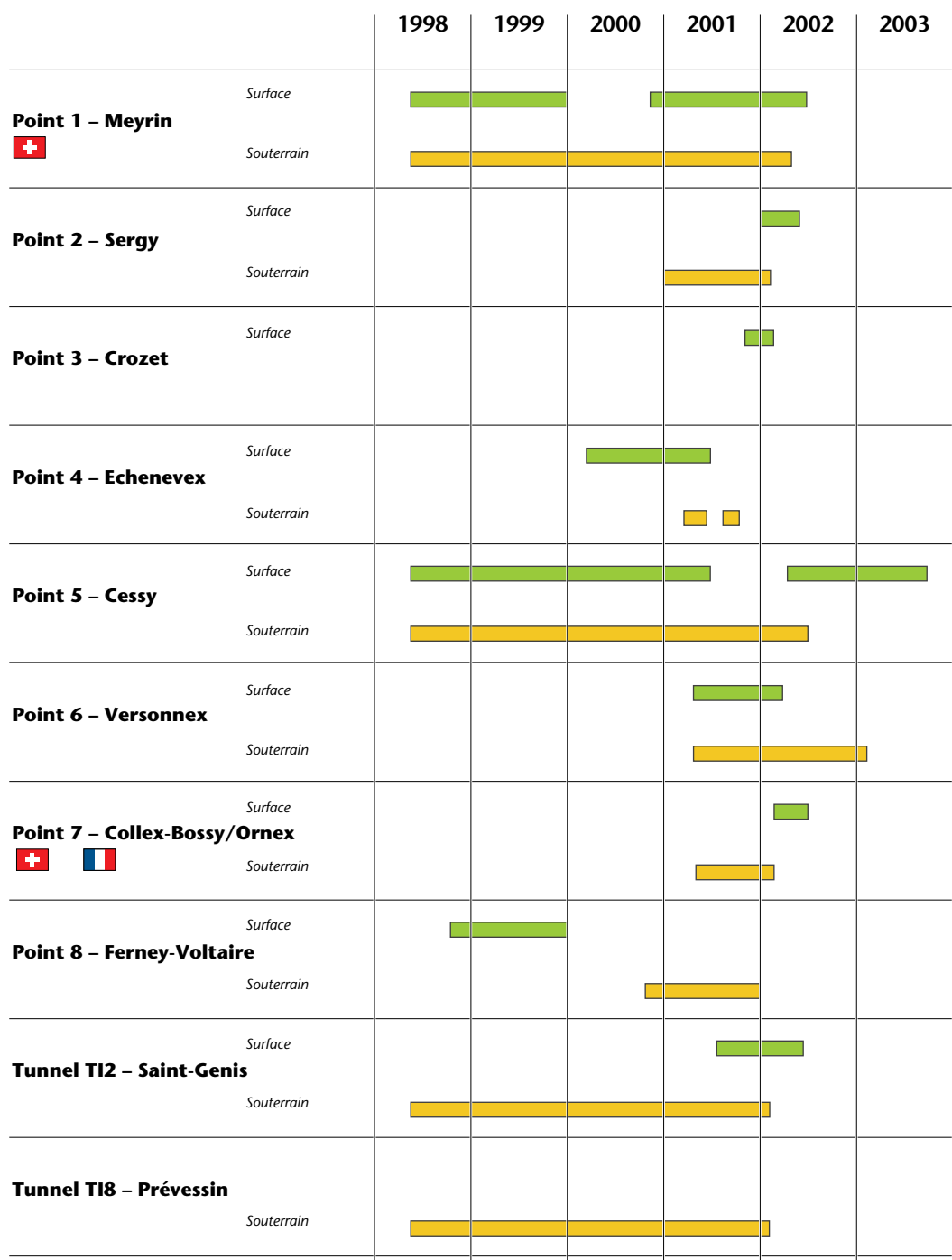


Figure 2.24

Déroulement des travaux de génie civil du LHC

Dans le cas de l'expérience CMS, on est amené à descendre à 100 m sous terre des sous-ensembles de 2 000 tonnes au moyen d'engins de levage provisoires

installés spécialement pour ces manœuvres. Cette méthode oblige à disposer rapidement d'une grande halle de montage en surface dont la construction débute dès 1998, et la descente des équipements vers la zone souterraine peut ainsi se faire à partir de l'automne 2003.

La figure 2.24 montre le déroulement des travaux tant pour les ouvrages souterrains que pour les bâtiments en surface.

Les aimants supraconducteurs de courbure et la cryogénie qui y est associée représentent près de 60% du coût de l'accélérateur. Ils sont fabriqués par l'industrie européenne, livrés, testés et installés selon la technique des flux tendus pour éviter les immobilisations financières et minimiser les besoins en espace de stockage. Les prototypes d'aimants construits par le CERN en collaboration avec l'industrie ont déjà fait la preuve que les performances requises peuvent être atteintes, voire dépassées. Leur optimisation industrielle permet d'en abaisser le coût de construction tout en augmentant leur fiabilité.

Le programme de recherche et développement se poursuit en parallèle avec la préparation par le CERN des spécifications techniques pour l'outillage, puis les appels d'offres, les soumissions et la préparation de cet outillage par l'industrie. Trente à quarante aimants de pré-série seront systématiquement testés avant de lancer la production en série d'environ 400 aimants par an pendant 3 ans, de 2002 à fin 2004.

A la mi-2005, tous les éléments de la machine et des détecteurs seront en principe en place. Après les essais indispensables pour un ensemble aussi complexe, naîtra la physique du troisième millénaire.

3

Description du projet LHC : les expériences

3.1

Programme initial et développements futurs

Les détails du programme expérimental du LHC ne sont pas encore complètement définis mais ce dernier sera assurément composé de quatre grands détecteurs. Deux d'entre eux seront les plus grandes installations de physique des hautes énergies jamais construites. Ces deux expériences, ATLAS et CMS, nécessitent la construction de deux nouvelles zones d'expérimentation situées respectivement aux Points 1 et 5 du tunnel existant. Ces deux zones sont décrites au paragraphe 4.1.3.1 "Point 1 : zone d'expérimentation ATLAS" à la page 91, et au paragraphe 4.1.3.3 "Zone d'expérimentation CMS au Point 5" à la page 96.

Les deux autres expériences, ALICE et LHC-B, seront du même ordre de grandeur que les quatre expériences qui fonctionnent au LEP depuis 1989. Il est par conséquent prévu qu'ALICE et LHC-B utilisent les zones d'expérimentation du LEP situées aux Points 2 et 8. Seuls des aménagements mineurs seront nécessaires.

Les deux grands détecteurs ATLAS et CMS sont conçus essentiellement pour observer les collisions entre protons, tandis que le détecteur ALICE observera les collisions entre ions lourds. Quant au détecteur LHC-B, il est destiné à étudier les particules contenant le cinquième quark b (beauté).

Mis à part les conséquences de leur taille, ces expériences au LHC doivent affronter les difficultés liées à des fréquences de collision très élevées, en particulier les problèmes concomitants de radorésistance et de saisie des données.

Cependant, le potentiel de recherche du LHC n'est certainement pas entièrement couvert par ces quatre expériences, et il est probable que les physiciens souhaitent utiliser l'une ou l'autre des halles souterraines restantes du LEP afin d'élargir leurs recherches à des points qui ne seraient pas traités par les quatre expériences initiales. L'équipement du Point 4 du LHC a d'ailleurs été conçu de manière à préserver cette possibilité le cas échéant. A l'heure actuelle, l'adjonction d'une cinquième expérience reste incertaine du fait des limitations budgétaires. Toutefois, l'existence de cette possibilité est intéressante pour l'avenir.

Les deux grands détecteurs ATLAS et CMS sont polyvalents ; ils ont été conçus pour servir à différents types de recherche ; ils fonctionneront en tant qu'instruments de recherche générale pendant 10 à 20 ans. Les promesses de découvertes du LHC sont néanmoins telles qu'elles paraissent suffisantes pour envisager ensuite une deuxième phase dans l'utilisation de ces détecteurs, moyennant un certain nombre de modifications. Il est pour ainsi dire impensable que la construction de nouvelles zones d'expérimentation soit nécessaire ; en effet, le champ couvert par le programme prévu actuellement est très vaste.

On peut également envisager des expériences, et donc des détecteurs, entièrement différents, spécialisés par exemple dans l'étude des neutrinos produits à chaque point de collision du LHC. La construction d'un détecteur de neutrinos avait d'ailleurs été discutée lors d'une des premières conférences concernant la physique au LHC en 1991.

L'idée avait été avancée de construire une nouvelle halle souterraine tangente à l'anneau du LHC avec un puits d'accès qui serait situé sur des terrains à la disposition du CERN face au bâtiment SM 18. Bien que n'étant pas envisagée pour l'instant, cette option reste ouverte et pourrait être réalisée ultérieurement si son intérêt scientifique devait l'exiger.

Un autre type d'expérience évoqué lors de la préparation du projet LHC mais abandonné pour l'instant était la construction d'une installation d'expérimentation à cible fixe. Dans ce type d'équipement, un faisceau est extrait de l'anneau principal et envoyé sur une cible.

Dans la mesure où le faisceau du LHC doit être sorti de l'anneau et absorbé à la fin de chaque période d'acquisition des données par les expériences, ce type d'équipement est d'une certaine manière déjà prévu. Il s'agit du système d'arrêt des faisceaux décrit par ailleurs dans ce document. Il serait possible d'équiper ces deux arrêts de faisceaux, ou l'un d'entre eux seulement, de détecteurs de particules et ce pourrait être l'un des développements futurs du LHC.

Tous les accélérateurs du CERN à l'exception des ISR ont connu des adaptations impossibles à envisager au moment de leur construction. Le SPS avait été conçu au départ comme une machine exclusivement consacrée aux expériences à cibles fixes. Cinq ans plus tard, il a été transformé en collisionneur proton-antiproton. De même personne n'aurait supposé en 1959, quand le PS a commencé à fonctionner, qu'il serait toujours utilisé 40 ans plus tard comme injecteur de nombreuses particules différentes pour toute une chaîne d'accélérateurs. Aujourd'hui avec l'arrivée du LHC, il est clair que le PS sera utilisé longtemps après son cinquantième anniversaire.

Un autre développement possible du LHC étudié actuellement est un nouveau programme de recherche pour le SPS. Ce programme utiliserait l'une des lignes de transfert construite pour le LHC et qui se trouve située dans l'axe d'un laboratoire souterrain situé en Italie, au Gran Sasso. Si une cible en métal lourd était installée à l'endroit adéquat le long de cette ligne de transfert, on pourrait créer des neutrinos au CERN et les détecter 750 km plus loin au sud de l'Italie. Ce type d'expérimentation n'exigerait qu'une modification mineure de la ligne de transfert TI 8, décrite ailleurs dans ce document (voir paragraphe 4.1.1.2 "Tunnel de transfert TI 8" à la page 85). Toutefois, une halle souterraine plus importante serait sans doute nécessaire pour abriter le même type de détecteur de neutrinos que celui qui fonctionne déjà au CERN.

Les physiciens considèrent aussi la possibilité de faire entrer en collisions des protons du LHC avec des électrons d'une machine comme le LEP, réinstallée dans le tunnel. Cette possibilité recèlerait un potentiel de recherche passionnant pour le CERN à l'horizon 2020-2025. Elle requerrait une adaptation des deux accélérateurs (LEP et LHC), ainsi que l'installation d'un nouveau détecteur, vraisemblablement dans l'une ou l'autre des deux grandes halles souterraines du LHC. Ce serait le prolongement naturel des recherches actuellement entreprises en Allemagne sur le collisionneur HERA par le laboratoire DESY à Hambourg.

3.2

L'expérience ATLAS

L'objectif principal d'ATLAS ¹, comme de CMS, est d'identifier les bosons de Higgs, en particulier par les muons qu'ils produisent à la fin de leur très courte vie. Ces muons doivent être identifiés au milieu d'une gerbe de centaines d'autres particules produites au même instant.

1. ATLAS : "A Toroidal LHC Apparatus" (ou appareillage toroïdal pour le LHC).

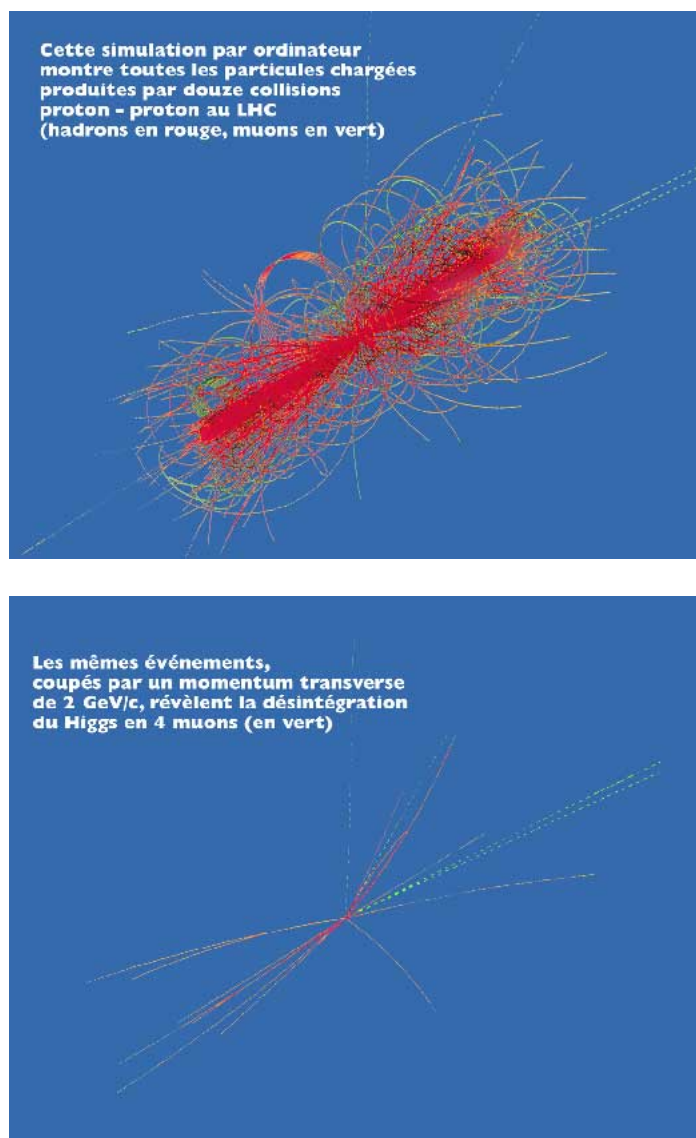


Figure 3.1

Simulation de la détection d'un boson de Higgs

Le dispositif expérimental d'ATLAS se présente sous la forme d'un grand aimant toroïdal¹ supraconducteur dont l'originalité réside dans la substitution de la culasse magnétique par l'air ambiant.

Les divers détecteurs s'articulent autour de la zone de collision des protons incidents, en couches successives. Ils constituent en fonctionnement un ensemble hermétique, où toutes les particules, à l'exception des neutrinos, laissent une trace de leur passage. Les particules traversent les détecteurs disposés dans un ordre qui permet d'en extraire le maximum d'informations. En

1. Un aimant toroïdal crée un champ magnétique circulaire autour du faisceau.

partant de la chambre à vide, où circulent les protons incidents, on trouve successivement :

- le trajectographe, détecteur de localisation des particules chargées, placé dans un champ magnétique produit par un solénoïde supraconducteur ;
- les calorimètres électromagnétiques où les photons, électrons et positons épuisent toute leur énergie ;
- les calorimètres hadroniques où la plupart des autres particules (sauf les muons et les neutrinos) dissipent lentement leur énergie, nécessitant l'utilisation d'une grande quantité de matière ;
- le spectromètre à muons qui représente la partie la plus volumineuse de l'appareillage expérimental.

Assemblé, ce dispositif expérimental s'élève à une hauteur de 22 m, s'étend longitudinalement sur 44 m et totalise un poids d'environ 7 000 tonnes.

La figure 3.2 représente une perspective éclatée d'ATLAS, qui est constitué d'une partie centrale quasi-cylindrique et de deux "bouchons".

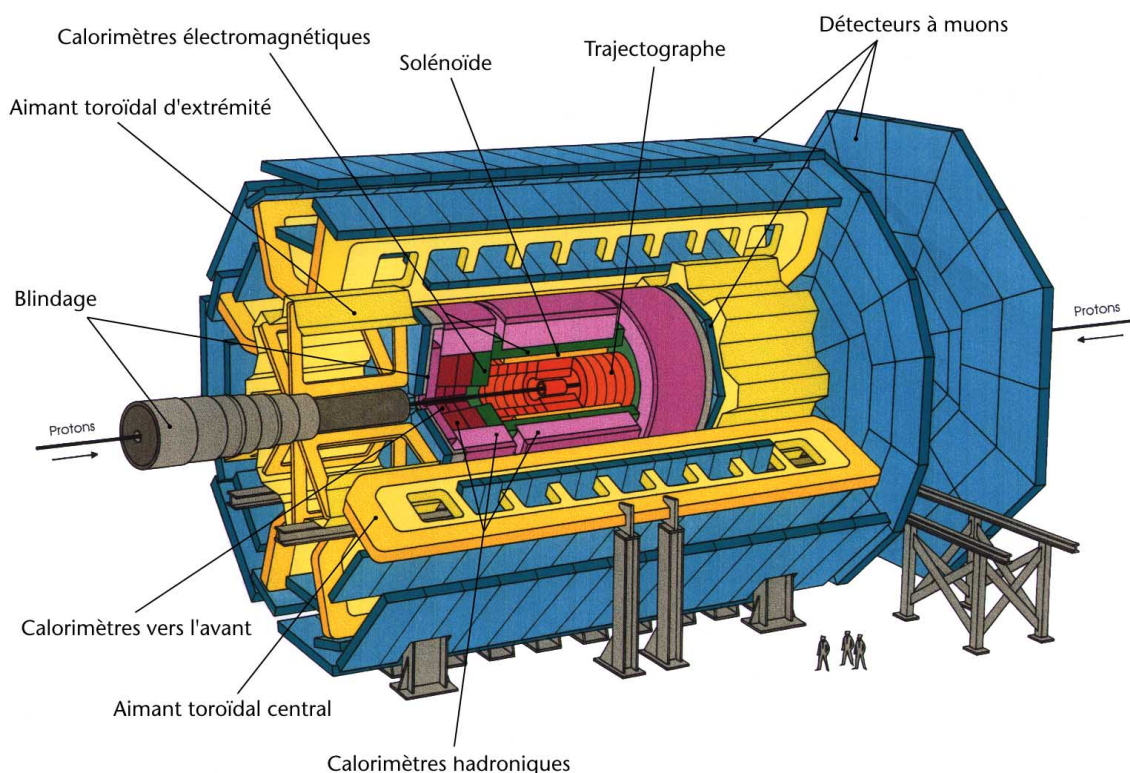


Figure 3.2

Perspective éclatée du détecteur ATLAS

3.2.1

L'appareillage scientifique

3.2.1.1

Le trajectographe

Ce détecteur complexe, regroupant environ 156 millions de cellules de lecture de technologies variées (détecteurs à semi-conducteurs, pixels en silicium et en arséniure de gallium, à tubes-paille), se présente sous la forme d'un cylindre de 2,3 m de diamètre extérieur et de 6,8 m de longueur.

La partie la plus proche de la chambre à vide possède une granularité très fine qui garantit une haute précision. Une deuxième partie concentrique est subdivisée de manière à fournir un grand nombre de points de mesures sur chaque trajectoire des particules. De plus, cette seconde partie du détecteur ATLAS contribue à l'identification des électrons. L'ensemble du détecteur central est traversé par un champ magnétique de 2 Tesla, fourni par un aimant solénoïdal supraconducteur.

3.2.1.2

Les calorimètres

L'ensemble de la calorimétrie aussi bien électromagnétique qu'hadronique est présent sous l'aspect de 6 instruments scientifiques distincts :

- 1 calorimètre hadronique central
- 2 calorimètres hadroniques qui prolongent le calorimètre central
- 1 calorimètre électromagnétique central
- 2 calorimètres d'extrémité combinant à la fois les fonctions électromagnétique et hadronique.

3.2.1.3

Les trois calorimètres hadroniques à "tuiles"

Le calorimètre est subdivisé en une partie centrale longue de 5,6 m prolongée de part et d'autre par des éléments de 2,6 m de longueur. Les diamètres extérieurs, identiques pour les trois parties, sont de 8,5 m. Le calorimètre est constitué de "tuiles" en fer comme éléments absorbeurs et de plaques de scintillateurs comme éléments actifs. L'ensemble du fer sert aussi de culasse pour le retour du flux magnétique produit par le solénoïde.

Le poids considérable de cet ensemble, évalué à 2 700 tonnes, a dicté que chacune de ces trois grandes parties soit assemblée par secteurs en de multiples modules indépendants.

3.2.1.4

Le calorimètre électromagnétique central

Le détecteur électromagnétique est constitué de plaques absorbantes en plomb pliées en forme d'accordéons, immergées dans un bain d'argon liquide agissant comme milieu ionisant. Afin de réduire la quantité de matière, le bobinage du solénoïde supraconducteur (voir le trajectographe) est intégré dans la chambre à vide du cryostat du cylindre central, dont les dimensions apparentes sont un

diamètre intérieur de 2,3 m, un diamètre extérieur de 4,6 m et une longueur hors-tout de 6,8 m.

3.2.1.5

Les calorimètres combinés d'extrémité

Les calorimètres d'extrémité sont composés de trois sections distinctes mais toutefois intégrées dans un même cryostat à argon liquide, toujours utilisé comme milieu ionisant. Le diamètre extérieur de ces deux calorimètres est de 8,5 m, et leur longueur est de 3,2 m.

La première section, par rapport à la zone des protons incidents, concerne la calorimétrie électromagnétique avec des plaques absorbantes en plomb. Dans la seconde section, dite hadronique, l'absorption est obtenue à l'aide de plaques de cuivre. La dernière section complète la calorimétrie générale vers l'avant, c'est-à-dire près de la chambre à vide des protons incidents et en s'éloignant de la zone de collision. Cette troisième section vers l'avant est à son tour subdivisée en trois parties : la première partie, électromagnétique, est constituée de cuivre, les deux parties hadroniques suivantes sont composées d'un alliage de tungstène.

3.2.1.6

Le spectromètre à muons

Le volume magnétique de ce spectromètre est déterminé par un ensemble d'aimants supraconducteurs, composé de l'aimant toroïdal central et de deux autres aimants toroïdaux qui viennent le fermer aux deux extrémités. La valeur maximum du champ magnétique est de 4 Tesla. Comme on l'a déjà indiqué, la particularité de ce dispositif est de ne pas comporter de culasse magnétique.

L'aimant toroïdal central est composé de huit enroulements rectangulaires et plats qui sont contenus dans des cryostats individuels. A l'aide de voussoirs, l'ensemble du toroïde central constitue une même et seule structure mécanique soutenue par 18 piliers ancrés au sol de la caverne. Avec ses 26 m de longueur hors-tout et ses 20 m de diamètre, cet aimant forme un ensemble imposant.

Chacun des deux aimants toroïdaux d'extrémité est composé de huit enroulements plats assemblés radialement et symétriquement autour de l'axe du faisceau. Assemblés dans un cryostat commun, ces aimants sont soutenus par les mêmes rails que ceux qui soutiennent les grands calorimètres et qui permettent ainsi d'accéder, par roulement, aux détecteurs intérieurs. Chacun des deux aimants toroïdaux d'extrémité se présente sous la forme d'une grande roue d'un diamètre extérieur de 10,70 m et d'une longueur de 5 m.

Les muons, particules chargées, sont faiblement absorbés par la matière. Ils sont identifiés par les traces qu'ils laissent dans un vaste réseau de détecteurs appelés chambres à muons. Ces détecteurs sont situés au-delà des calorimètres et jusqu'aux confins de la caverne expérimentale où ils occupent la superficie de grands disques verticaux de 22 m de diamètre. On dénombre environ 850 chambres à muons.

3.2.2**Systèmes cryogéniques**

Trois fluides cryogéniques sont utilisés dans les différents sous-ensembles de détecteurs constituant ATLAS :

- L'argon liquide, milieu ionisant pour les calorimètres électromagnétiques. Emmagasiné à l'origine dans deux grands réservoirs situés dans la caverne principale, il est refroidi par des échangeurs de chaleur.
- L'hélium liquide, pour la réfrigération des quatre aimants supraconducteurs. Il est produit par un liquéfacteur recevant l'hélium depuis la surface sous forme gazeuse à haute pression et à température ambiante.
- Un circuit fermé d'azote liquide alimente des échangeurs de chaleur dans le complexe à argon liquide et sert au pré-refroidissement avant le remplissage d'argon liquide. L'azote liquide est aussi utilisé comme fluide de pré-refroidissement avant la circulation de l'hélium liquide dans les aimants expérimentaux.

Tableau 3.1**ATLAS – Paramètres généraux**

Longueur hors-tout (m)	44
Diamètre (m)	22
Poids total (t)	7 000

Tableau 3.2**ATLAS - Aimants du spectromètre**

	Toroïde central	Aimants toroïdaux d'extrémité	Solénoïde
Longueur (m)	25,2	5,0	5,3
Hauteur (m)		10,7	
Diamètre extérieur (m)	20		4,4
Diamètre intérieur (m)	9,4		2,3
Poids (t)	1 000	2 x 240	5
Champ magnétique (T)	4 max.	4 max.	2

Tableau 3.3 ATLAS – Instrumentation scientifique

	Technologies	Nombre de plans	Nombre de canaux	Dimensions (m)	Poids (t)
Trajectographe	ensemble de pixels	18 vertic. 6 horiz.	150 millions	L = 6,8 Ø ext. 2,3	3,5
	rubans au silicium		4 millions		
	tubes-paille	196 vertic. 73 cylind.	400 000		
Calorimètre électromagnétique central	plomb, argon liquide	1	123 000	Ø ext. 4,6 L = 6,8 Ø int. 2,3	250
Calorimètres combinés	cuivre, plomb, argon liquide	2	82 000	Ø ext. 4,6 L = 3,2 Ø int. 0,2	2 x 265
Calorimètre hadronique central	à tuiles, scintillateurs/fer	1	10 000	Ø ext. 8,5 L = 5,6 Ø int. 4,6	1 300
Calorimètres hadroniques d'extrémité		2		Ø ext. 8,5 L = 2,6 Ø int. 4,6	2 x 650
Chambres à muons (mesure et détente)	tubes à dérive, rubans cathodiques, plaques résistives, espaces minces	3 vertic. 4 horiz.	1,5 millions	Couverture de 5 300 m ²	500

3.3

L'expérience CMS

Le détecteur CMS, acronyme pour Compact Muon Solenoid (Solénoïde Compact pour Muons), est installé au Point 5 du LHC, sur le territoire de la commune de Cessy.

Le concept d'une expérience polyvalente compacte au LHC fondée sur un champ magnétique solénoïdal a été discuté pour la première fois en 1990 à Aix-la-Chapelle, et la manifestation d'intérêt officielle a été présentée en 1992 à Evian. C'est là que le nom de CMS a été rendu public pour la première fois. Dans une expérience de collision proton–proton à haute luminosité, un point de départ naturel consiste à optimiser le système de détection des muons. Le concept de CMS exigeait un champ magnétique élevé de 4 Tesla, obtenu dans un solénoïde supraconducteur, d'une longueur de 13 m et d'un diamètre de 6 m (voir figure 3.3 à la page 64).

Les objectifs principaux retenus pour la conception de CMS sont :

- un système de muons excellent et surdéterminé,
- le meilleur calorimètre électromagnétique possible,
- une trajectographie centrale de grande qualité,
- un détecteur d'un prix accessible.

Globalement, CMS cherche à détecter clairement les diverses signatures des nouvelles particules produites en identifiant et en mesurant avec précision les muons, électrons et photons jusqu'aux plus hautes énergies. Le détecteur est conçu pour fonctionner à des fréquences de collisions très élevées tout en tirant parti d'une exploitation à plus faible luminosité. En dehors des collisions proton-proton, CMS permettra également d'observer des muons émergeant des collisions des faisceaux d'ions lourds au LHC.

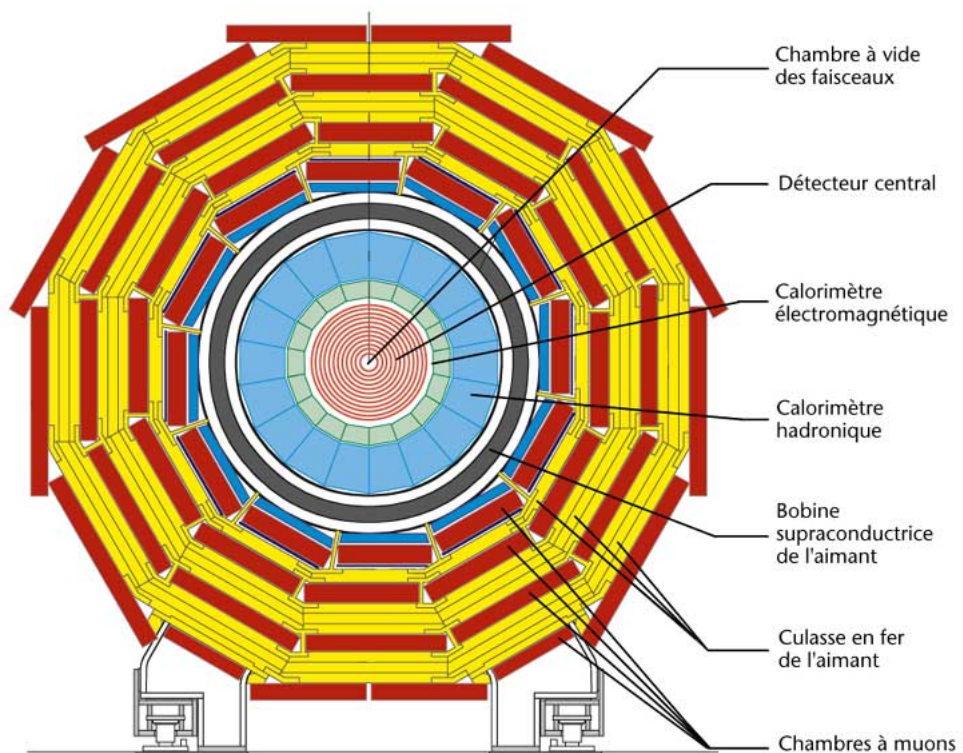


Figure 3.3

Coupe transversale du détecteur CMS

3.3.1

L'aimant supraconducteur

Le choix de l'aimant a été le point de départ de l'ensemble du concept CMS. Les dimensions imposantes du solénoïde et son champ magnétique puissant (4 Tesla) évitent d'avoir recours à des aimants supplémentaires vers l'avant et

l'arrière pour la mesure des muons, et permettent aux systèmes de trajectographie et de calorimétrie d'y trouver aisément place.

La structure dodécagonale, conçue au CERN, est découpée le long de l'axe du faisceau en 5 anneaux d'une épaisseur de 2,6 m, l'anneau central supportant la bobine supraconductrice interne (voir figure 3.4). Des "bouchons" referment le volume de l'aimant. La bobine elle-même, conçue à Saclay, est divisée en quatre sections de 6,8 m de diamètre, dimension hors-tout maximale compatible avec le transport par la route.

Le câble conducteur comporte 40 brins en niobium-titane noyés dans de l'aluminium pour la stabilisation. Avec une puissance cryogénique de 900 W à 4,5 K et de 3 400 W à 60 K, la mise en froid prend 32 jours.

3.3.2

L'appareillage scientifique

3.3.2.1

Le trajectographe

Pour faire face à la multiplicité des traces dans le trajectographe, appelé détecteur central, il faut des détecteurs avec des cellules très petites. Des détecteurs avec semi-conducteurs à micropistes et des détecteurs à gaz à micropistes (moins de 1 m³ de volume de gaz) apportent la granularité et la précision nécessaires. Deux couches de détecteurs à "pixels" ont été ajoutées pour améliorer les mesures des paramètres d'impact des trajectoires et des vertex secondaires. Les détecteurs en silicium à micropistes et à "pixels" sont maintenus à 0 °C afin de ralentir leur détérioration.

Les détecteurs sont d'une grande efficacité pour la reconnaissance des traces isolées avec une impulsion transversale élevée. La bonne précision de la mesure de l'impulsion est une conséquence directe du champ magnétique élevé.

3.3.2.2

La calorimétrie électromagnétique et hadronique

Comme la bobine est d'un rayon suffisant pour installer toute la calorimétrie à l'intérieur, on peut envisager un calorimètre électromagnétique de grande précision. CMS a choisi un calorimètre en cristaux de tungstate de plomb (PbWO₄) qui fournit une résolution de masse des di-photons deux fois meilleure que celle prévisible avec un calorimètre plus conventionnel constitué de plaques de plomb intercalées avec des plaques de scintillateur en matière plastique. Le volume nécessaire (approximativement 12,5 m³) est deux fois plus petit que celui occupé par d'autres cristaux. Le cristal PbWO₄ lui-même est relativement facile à produire et il existe suffisamment de matière première et de capacité industrielle.

Le calorimètre hadronique utilise des plaques de cuivre intercalées avec des carreaux de scintillateur en matière plastique lus à travers des fibres à décalage de longueur d'onde.

3.3.2.3

Le détecteur à muons

Quatre couches de détecteurs à muons intercalées dans la culasse de l'aimant identifient et mesurent les muons produits dans la région centrale. La disposition de ces chambres de détection permet d'optimiser l'acceptance géométrique. Chaque couche comprend 12 plans de tubes à dérive en aluminium conçus pour retrouver le muon, représenté dans l'espace par un vecteur, avec une précision de 100 μm pour sa position et un écart de moins d'un milliradian pour l'angle de la direction. Les quatre couches comprennent également des plans de déclenchement ¹ qui identifient le croisement des paquets de faisceau et permettent une sélection sur l'impulsion transversale du muon dans le déclenchement de premier niveau.

Le système de muons des bouchons comprend également quatre couches. Chaque couche comprend 6 plans de chambres à rubans cathodiques. Les dernières couches se trouvent après un total d'environ 20 longueurs d'interaction, de sorte que seuls les muons peuvent les atteindre. La grande puissance du champ magnétique pour courber les traces est la clé d'une bonne résolution sur l'impulsion, même dans le mode dit autonome, en particulier pour des impulsions transversales élevées.

Les chambres à muons ont un grand volume et sont remplies de gaz ininflammable, y compris d'un fréon sans danger pour l'environnement.

3.3.2.4

L'acquisition des données

A la luminosité nominale du LHC, le détecteur CMS doit scruter 20 collisions extrêmement complexes toutes les 25 milliardièmes de secondes. Ce débit d'entrée d'un milliard d'interactions par seconde doit être filtré à 100 pour l'analyse en différé.

Une sélection à deux niveaux permet d'y parvenir. Le premier niveau utilise les données simultanées des détecteurs de muons et des calorimètres pour parvenir à une décision après un délai fixe de 3 microsecondes.

Ces données, provenant d'un maximum de 100 000 interactions par seconde issues des seuls détecteurs de muons et calorimètres, avancent jusqu'à un groupe de processeurs en ligne. Ce second niveau utilise toutes les données retenues pour obtenir un nouveau tri des événements significatifs. La totalité des données des événements résultant de ce tri parvient alors au groupe de processeurs pour un traitement complémentaire.

3.3.2.5

L'assemblage de CMS

L'assemblage de l'expérience CMS commence avec la construction de l'aimant dans le bâtiment de surface. Étant donné les dimensions et le poids de cet aimant, le bâtiment de surface doit être construit de manière à permettre le

1. *Resistive Plate Chambers* ou Chambres à plaques résistives

pré-montage dans les meilleures conditions. Une fois l'aimant assemblé, un test final est fait avant qu'il ne soit installé dans la cavité souterraine. C'est là que tous les autres détecteurs sont également installés dans la bobine et la culasse et que le câblage de l'ensemble est fait.

Une fois l'installation en sous-sol terminée, le bâtiment de surface est abaissé à une taille suffisante pour les besoins de l'exploitation.

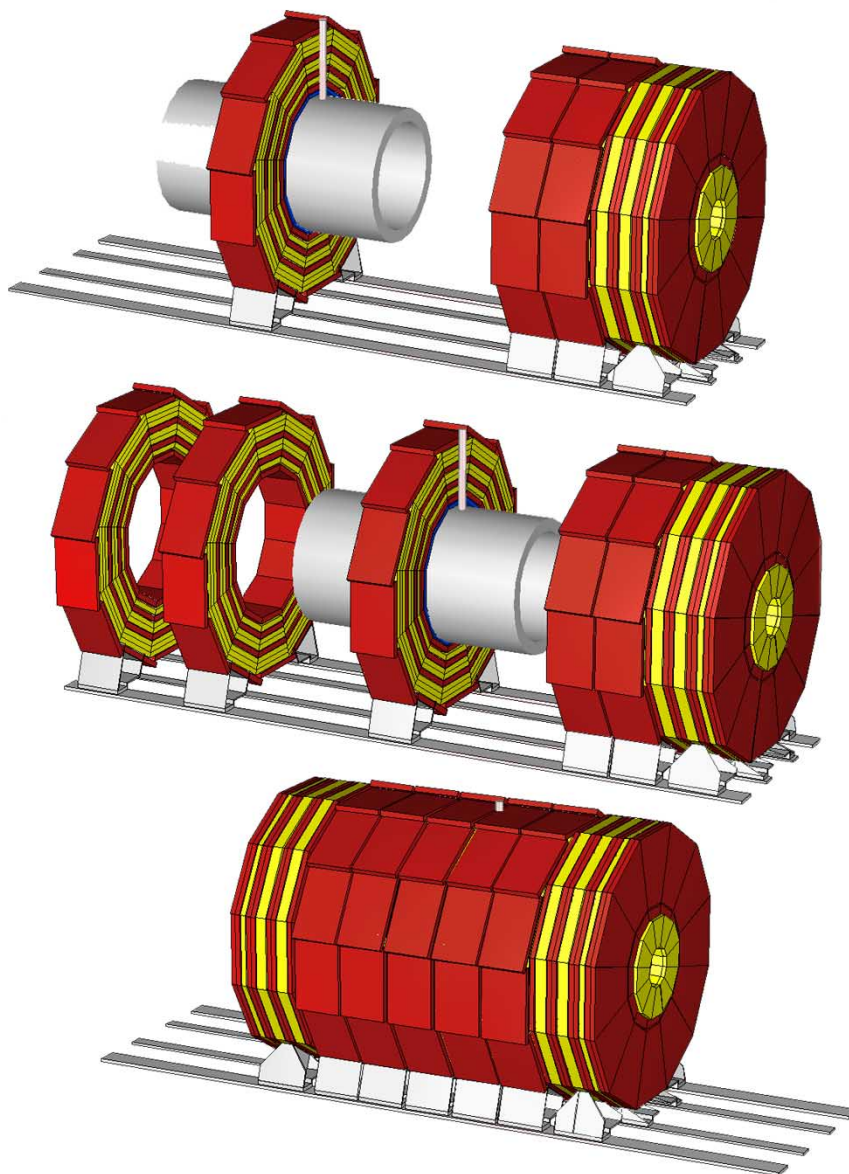


Figure 3.4

Construction modulaire du détecteur CMS

3 - Description du projet LHC : les expériences

Tableau 3.4

CMS – Paramètres généraux

Longueur hors-tout (m)	22
Diamètre (m)	15
Poids total (t)	14 500

Tableau 3.5

CMS – Aimant bobine supraconductrice

Longueur (m)	13
Hauteur (m)	6
Poids (t)	500
Champ magnétique (T)	4

Tableau 3.6

CMS – Instrumentation scientifique

	Technologies	Nombre de plans	Nombre de canaux	Dimensions
Détecteur Micro Vertex	Silicium	2	70 millions	Couverture de 1,6 m ²
Trajectographe intérieur	Silicium	3	3 millions	Ø 20 - 44 cm
Trajectographe extérieur	MSGC	7	11 millions	Ø 50 - 120 cm
Calorimètre électromagnétique	Cristaux de plomb (PbWO ₄)	1	100 000	Ø 140 - 185 cm
Calorimètre hadronique	Scintillateurs/cuivre	1	150 000	Ø 185 - 285 cm
Filtre à muons	Fer	3	0	Couverture de 14 x 20 m ²
Chambres à déclenchement centrales	Chambres à plaques résistives	6	120 000	Couverture de 2 600 m ²

Tableau 3.6

CMS – Instrumentation scientifique

	Technologies	Nombre de plans	Nombre de canaux	Dimensions
Chambres à déclenchement du bouchon	Chambres à plaques résistives	6	80 000	Couverture de 1 950 m ²
Chambres à muons centrales	Chambres à dérive	4	200 000	Couverture de 1 730 m ²
Chambres à muons du bouchon	Chambres à rubans cathodiques	4	600 000	Couverture de 1 300 m ²

3.4

L'expérience ALICE

Le détecteur de l'expérience ALICE¹ est dédié à l'étude des collisions entre ions lourds. Le détecteur réutilise en grande partie l'infrastructure de l'expérience L3 du LEP, située au Point 2, sur la commune de Sergy.

3.4.1

Programme de physique

Si les recherches proposées par les deux grandes expériences ATLAS et CMS se concentrent principalement sur la question du mécanisme responsable des masses des particules et sur les prédictions des théories supersymétriques, le but de l'expérience ALICE est tout autre.

Le LHC n'est pas seulement conçu comme collisionneur de protons, mais est également capable d'accélérer des ions de différentes espèces, notamment des ions lourds tels que des ions de plomb. L'accélération et la collision des faisceaux d'ions de plomb permettent de réaliser une extrême concentration d'énergie.

La théorie de la force nucléaire dite "forte" prédit qu'à la densité de la matière qui deviendra ainsi accessible, un tout nouvel état pourrait être réalisé, jamais observé jusqu'ici : le plasma de quarks et de gluons. On peut s'imaginer cet état comme une "soupe" où les quarks et les gluons, qui sont les particules constituantes des hadrons tels que protons et neutrons, ont rompu leurs liens et évoluent librement comme les molécules d'un gaz.

Le but de l'expérience ALICE est de détecter des signaux de ce plasma de quarks et de gluons et d'en déterminer les propriétés. Selon les théories cosmo-

1. ALICE : A Large Ion Collider Experiment ou Expérience avec un Grand Collisionneur d'Ions

logiques actuelles, ALICE propose l'étude de la matière dans un état qui était présent moins d'un millionième de seconde après le "Big Bang".

3.4.2

Le détecteur

Pour détecter des signaux du plasma des quarks et gluons, les instituts de recherche membres de la collaboration ALICE se proposent de construire un détecteur capable d'étudier des collisions centrales d'ions de plomb à l'énergie du LHC, c'est-à-dire 1 148 TeV, soit des énergies 300 fois plus élevées que celles utilisées actuellement. La spécificité de l'expérience, en comparaison avec ATLAS et CMS, est sa capacité à "digérer" les dizaines de milliers de particules d'énergie relativement basse qui sont produites dans les collisions des ions de plomb.

L'élément principal de l'expérience est un grand électro-aimant qui entoure des instruments sophistiqués permettant de mesurer avec précision les trajectoires des particules produites dans les collisions et d'identifier ces particules comme étant des photons, électrons, pions ou autres.

L'aimant de l'expérience L3, qui est installé au Point 2 du LEP, est quasiment à tous points de vue l'aimant idéal pour ALICE. ALICE réutilise donc l'aimant de L3 dans sa position actuelle et sans modifications essentielles. Des économies importantes sont ainsi réalisées : en plus de l'aimant lui-même, la plus grande partie de l'infrastructure existante au Point 2 du LEP peut être réutilisée elle-aussi. La figure 3.5 donne un aperçu de l'expérience proposée, située dans la halle souterraine du Point 2 du LEP.

3.4.3

La collaboration à ALICE

L'expérience ALICE s'inscrit dans une lignée d'expériences utilisant des ions lourds au CERN. Ces expériences ont débuté en 1986 avec l'accélération, dans le Super Proton Synchrotron, d'ions d'oxygène et de soufre. A présent, cette ligne est poursuivie avec un programme vigoureux d'expériences à cible fixe avec des faisceaux d'ions de plomb.

Tableau 3.7

ALICE – Paramètres généraux

Longueur hors-tout (m)	25
Diamètre (m)	15
Poids (t)	10 000

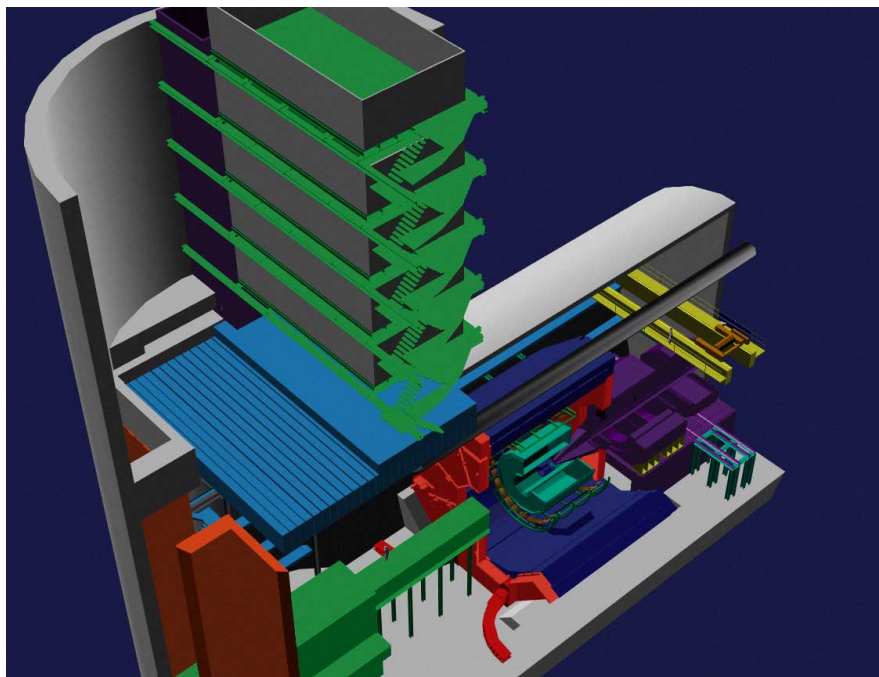


Figure 3.5

Vue artistique du détecteur ALICE dans la salle d'expérimentation

Dans le domaine des interactions d'ions lourds à très haute énergie, la distinction traditionnelle entre physiciens nucléaires et physiciens des hautes énergies est devenue de plus en plus vague. Les programmes de recherche du CERN ont ainsi été élargis et ouverts à la communauté des scientifiques venus de la recherche en physique nucléaire.

Tableau 3.8

ALICE - Aimants du spectromètre

	Toroïde central (aimant L3)	Aimant dipolaire dimuon
Longueur (m)	15	5
Largeur (m)		8
Hauteur (m)		6
Diamètre (m)	15	
Poids (t)	8 300	1 000
Champ magnétique (T)	0,2	0,7

Tableau 3.9

ALICE – Instrumentation scientifique

	Technologies	Nombre de plans	Nombre de canaux	Dimensions
Trajectographe intérieur	pixels, rubans, chambres à dérive	6	17 millions	L = 0,245 à 1,008 m Ø int. 0,078 m Ø ext. 0,900 m
Trajectographe principal	TPC		500 000	L = 5 m Ø int. 1,76 m Ø ext. 5 m
Identification des particules	Pestov ou PPC	1 2	396 288 167 040	L = 7 m Ø = 7,9 m
Identification des particules (hautes impulsions)	RICH	1	9 044	Couverture de 12 m ²
Spectromètre à photons	Cristaux de PbWO ₄	1	36 608	Couverture de 18 m ²
Trajectographe à muons	Chambres à rubans cathodiques	10	828 000	Ø 1,83 à 5,13 m
Chambres de déclenchement du spectromètre dimuon	Plaques résistives	4	20 000	Couverture de 6 x 6 m ²

3.5

L'expérience LHC-B

Le LHC est une source abondante de particules contenant le cinquième quark, (appelé b ou beauté). L'étude de cette particule est d'une importance toute particulière pour la physique des hautes énergies, dans la mesure où elle est supposée aider à comprendre la légère rupture d'une symétrie par ailleurs parfaite permutant simultanément particule et antiparticule, et la gauche et la droite.

Ce phénomène est connu des physiciens depuis 30 ans sous le nom de violation de CP, et il est considéré comme étant à l'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'univers. Toutefois, sa cause reste mystérieuse. Au moment du Big Bang, des quantités égales de particules et d'antiparticules furent produites ; d'une manière ou d'une autre, la violation de symétrie fit pencher la balance du côté de la matière que nous connaissons. Cet effet est d'une telle importance pour la connaissance de l'univers qu'il vaut d'être étudié dans une expérience spécifique faisant partie du programme initial du LHC.

Le Comité des expériences du LHC étudie une "Déclaration d'intention" signée par plus de 200 physiciens provenant de 36 instituts de recherche du monde entier. La préparation technique de cette expérience, connue sous le nom de LHC-B, a été approfondie au cours de l'année 1996 et aboutira à une "Proposition technique" détaillée en 1997.

3.5.1

Le Spectromètre LHC-B

Le dispositif expérimental proposé par LHC-B est constitué essentiellement d'un spectromètre magnétique asymétrique. Ce spectromètre sera installé dans la halle existante au Point 8 du LHC. Il remplacera l'expérience DELPHI du LEP à laquelle il est similaire en termes de taille, de poids, de type et de nombre de détecteurs de particules (voir figure 3.6).

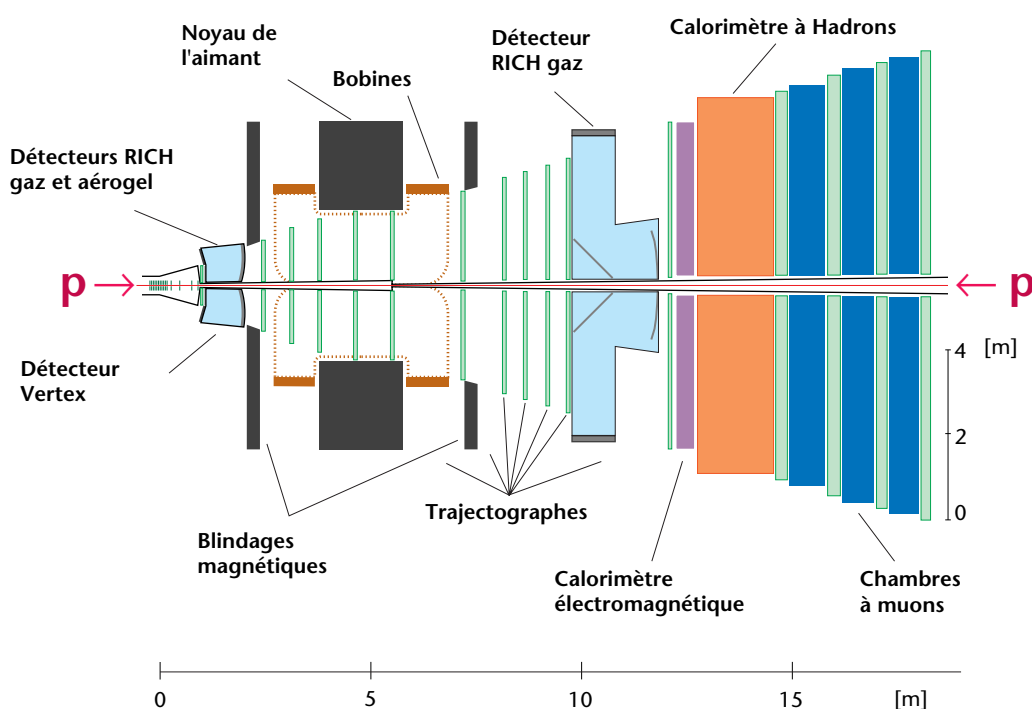


Figure 3.6

Vue artistique du détecteur LHC-B

3.5.2

Adaptation de l'infrastructure existante

L'expérience LHC-B réutilise pour l'essentiel les ouvrages souterrains construits pour l'expérience DELPHI du LEP, notamment la halle d'expérimentation souterraine. Le tunnel doit toutefois être légèrement modifié. Une alcôve est réalisée à proximité de la halle d'expérimentation et le diamètre actuel du tunnel de la machine passe ainsi de 4 à 15 m sur une distance d'environ 10 m. De plus, de nouveaux blindages doivent être ajoutés pour permettre l'accès aux halles techniques souterraines pendant le fonctionnement du LHC. Un mur de

4 m d'épaisseur est donc construit entre le spectromètre LHC-B et les salles d'électronique.

3.5.3

Aimant supraconducteur

Le principal aimant de détection de LHC-B est un aimant dipolaire supraconducteur pesant environ 1 000 tonnes. Cet aimant fonctionne à 4,5 K et dissipe une énergie de l'ordre de 1 kW. Cette énergie est supérieure à celle dégagée par l'aimant actuel de l'expérience DELPHI du LEP, et suppose donc le renforcement de la centrale cryogénique située au Point 8.

3.5.4

Les différents détecteurs de particules et leurs éléments associés

Les détecteurs de particules LHC-B sont en fait des détecteurs de particules de haute énergie de conception classique, construits de manière à mesurer les trajectoires, déceler et identifier précisément les particules produites lors des collisions à 14 TeV du LHC. Leurs principales caractéristiques sont présentées ci-après (tableaux 3.10, 3.11, 3.12).

L'électronique permettant à ces détecteurs d'assurer leur fonction est technologiquement plus avancée que celle utilisée pour le LEP et devrait donc requérir moins de place et moins d'énergie. Par conséquent, l'ensemble des salles de contrôle actuelles ainsi que leurs systèmes de climatisation restent adéquats.

Les gaz utilisés sont pour la plupart des mélanges de gaz non inflammables qui empruntent les systèmes de stockage et d'alimentation principaux existants.

Tableau 3.10

LHC-B - Paramètres généraux

Longueur (m)	18
Largeur (m)	12
Hauteur (m)	12
Poids total (t)	4 270

Tableau 3.11

LHC-B - Aimant dipolaire supraconducteur

Longueur (m)	4,6
Largeur (m)	5
Hauteur (m)	7,5

Tableau 3.11

LHC-B - Aimant dipolaire supraconducteur

Poids (t)	985
Champ magnétique (T)	1,2

Tableau 3.12

LHC-B - Instrumentation scientifique

	Technologies	Nombre de plans	Nombre de canaux	Dimensions (m)	Poids (t)
Détecteur Micro Vertex	Silicium	19	150 000	0,1 x 0,1	0,5
Aérogel RICH	Miroirs de focalisation	1	191 000	Ø 1,5	1
Gaz RICH 1	Miroirs de focalisation	1	111 000	Ø 3	5
Trajectographe intérieur	Chambres à rubans cathodiques ^a	13	81 900	0,4 x 0,4	0,25
Trajectographe extérieur	Rubans en nids d'abeille	13	183 296	8 x 8 max.	10
Gaz RICH 2	Miroirs de focalisation	1	297 000	Ø 9	10
Calorimètre électromagnétique	Scintillateurs/plomb	1	10 308	8,1 x 8,1	121,5
Calorimètre hadronique intérieur	Scintillateurs/tungstène/cuivre	épais. 1,8 m	1 280	0,96 x 0,96	10
Calorimètre hadronique extérieur	Scintillateurs/tungstène/cuivre	épais. 1,8 m	6 418	9 x 9	950
Filtre à muons	Fer	3	0	11 x 11	2 150
Chambres à muons	Chambres à rubans cathodiques	6	256 000	9 x 9 max.	40

a. MCSC : Micro-cathode strip chamber

3.6

Des collaborations mondiales

Le CERN accueille d'ores et déjà près de la moitié de l'ensemble des chercheurs en physique des particules dans le monde (voir figure 3.7). Avec le LHC, la mondialisation de la recherche menée au CERN va devenir plus marquée encore. En effet, le LHC est non seulement une porte d'accès à une physique

entièrement nouvelle, mais c’est aussi un instrument de recherche unique. Dès sa conception, des équipes de tous les continents ont été amenées à collaborer.

Cette mondialisation est particulièrement sensible pour les expériences ATLAS et CMS, que plus de 3 000 chercheurs préparent déjà activement. Les expériences ALICE et LHC-B, bien que de tailles plus réduites, vont également ouvrir la voie à une série de collaborations dans la lignée des expériences du LEP et élargir les programmes de recherche du CERN.

Tableau 3.13 Collaborations dans les expériences du LHC

Expériences	Nombre de chercheurs	Nombre d’instituts
ALICE	560	63
ATLAS	1 600	148
CMS	1 522	138
LHC-B	220	38

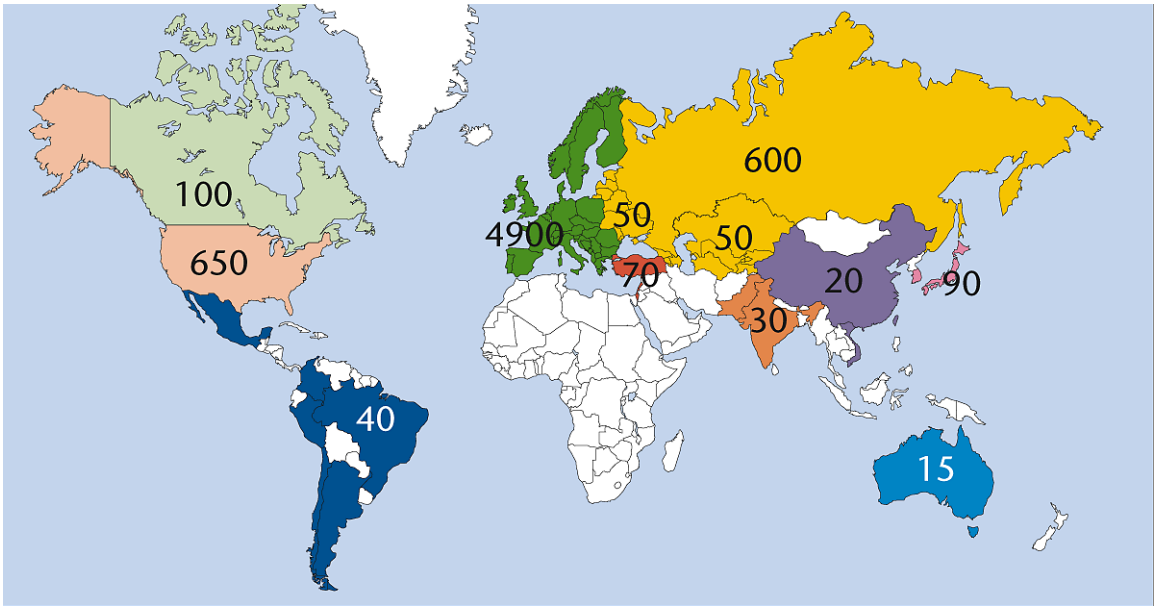


Figure 3.7 Les utilisateurs du CERN (au 01/01/1996)

4

Ouvrages à réaliser

Le projet LHC utilise au maximum l'infrastructure du LEP, aussi bien les ouvrages souterrains que les bâtiments de surface. L'ensemble des ouvrages souterrains constitué par le tunnel, les puits et les halles souterraines du LEP représente un volume utile de 600 000 m³, la surface de l'ensemble des bâtiments existants étant de 50 500 m² (tableau 4.3 à la page 81 et tableau 4.4 à la page 82).

Cependant, l'adjonction d'un certain nombre d'ouvrages est nécessaire, principalement pour loger les deux grandes expériences et pour transférer les protons du SPS vers le LHC. Les nouveaux ouvrages figurent en rouge sur les schémas.

Seules les nouvelles constructions souterraines et en surface sont décrites plus loin dans ce chapitre. Elles représentent respectivement un volume utile de 243 000 m³ et une surface bâtie de 28 900 m². La nomenclature adoptée pour les ouvrages du LHC est dérivée de celle du LEP et en indique l'usage. Elle est rappelée ci-dessous.

Tableau 4.1

Nomenclature des ouvrages souterrains LEP/LHC

Code	Description
PM	Puits machine pour l'accès du personnel, la manutention des éléments de la machine, le passage des câbles, des tuyauteries et des gaines de ventilation.
PMI	Puits d'installation des aimants de l'accélérateur.
PX	Puits des expériences pour la manutention des éléments des détecteurs.
PZ	Puits pour l'accès du personnel aux halles d'expérimentation.
PGC	Puits pour le génie civil servant à l'exécution des travaux à partir de leur base et qui, par la suite, ne sont ni revêtus de béton, ni équipés.
R	Tunnel du collisionneur, pouvant devenir RA, RB, RI, RJ, RM ou RZ à l'occasion d'un agrandissement de son diamètre.
TD	Tunnels des absorbeurs de faisceaux.
TI, TJ	Tunnels de transfert. Ils permettent le transfert des électrons et des positons ou des protons de l'accélérateur SPS vers l'anneau principal du LEP et du LHC.
UA, UR	Galeries techniques abritant des klystrons pour le LEP ou des alimentations électriques pour le LHC.
UD	Halles des absorbeurs de faisceaux.
UJ	Chambres de jonction. Ces chambres raccordent les galeries auxiliaires au tunnel de la machine.
UL	Galeries de liaison. A partir du fonds des puits PM, ces galeries permettent l'accès direct au tunnel de l'accélérateur-collisionneur.
UP	Galeries de passage du personnel utilisées pour des raisons techniques ou des impératifs de sécurité.
US	Halles de service. La plupart des puits débouchent en tréfonds sur des halles de services US ou des halles d'expérimentation UX.
UW	Halles techniques. Ces halles sont raccordées aux halles US et contiennent les pompes et autres équipements nécessaires au refroidissement des éléments de la machine et des expériences.
UX	Halles d'expérimentation. Ces halles sont construites, soit dans l'axe du faisceau, soit dans le prolongement des halles de service US. Dans chaque halle UX est installée l'une des 4 expériences du LEP ou des 2 grandes expériences du LHC comprenant les détecteurs de particules ainsi que tous les équipements électroniques qui leur sont associés pour les mesures et le contrôle.

Tableau 4.2

Nomenclature des bâtiments LEP/LHC

Code	Description
SA	Bâtiments auxiliaires.
SD	Bâtiments en tête du puits desservant l'accélérateur. Les bâtiments SD couvrent les puits desservant les cavernes techniques de l'accélérateur. Leur rôle est d'abriter la tête de puits comportant la machinerie de l'ascenseur et le local pressurisé d'évacuation du personnel, d'abriter le pont roulant desservant le puits, d'assurer le stockage tampon du matériel à installer de manière à optimiser l'utilisation du pont roulant, ainsi que d'abriter la boîte froide supérieure du système cryogénique. Cette dernière partie est nommée SDH.
SDI	Bâtiments en tête du puits d'installation de l'accélérateur.
SDX	Bâtiments en tête du puits desservant la halle technique. Les bâtiments SDX couvrent les puits desservant les halles techniques des expériences. Ils abritent la tête de puits comportant la machinerie de l'ascenseur et le local pressurisé d'évacuation du personnel, de même que le pont roulant desservant le puits. Ils permettent également le stockage tampon du matériel à installer de manière à optimiser l'utilisation du pont roulant.
SE	Bâtiments sous-stations électriques. Ces bâtiments peuvent se classer en deux sous-catégories, les bâtiments SEM contenant les cellules 18 kV, les départs basse tension et leurs contrôles, les bâtiments SES de sécurité regroupant les systèmes de sécurité, les ordinateurs et l'alimentation assurée.
SF	Sous-stations de pompage et réfrigérants atmosphériques.
SGX	Bâtiments gaz comportant le stockage des gaz neutres et inflammables, ainsi que les locaux destinés aux systèmes de mélange, de purification, de distribution primaire, de ventilation et à l'alimentation.
SH	Bâtiments cryogénie abritant les compresseurs d'hélium qui alimentent les systèmes cryogéniques de l'accélérateur (SHM) et des expériences (SHX), leurs alimentations électriques ainsi qu'une salle de commande.
SHE	Plates-formes de stockage d'hélium destinées à recevoir un nombre variable de réservoirs de stockage d'hélium gazeux d'un volume de 250 m ³ sous une pression maximum de 2 MPa (20 bars).
SL, SLU	Galeries aériennes de ventilation ou galeries de liaison.
SM	Bâtiment destiné au montage.

Tableau 4.2

Nomenclature des bâtiments LEP/LHC (suite)

Code	Description
SR	Bâtiment logeant les redresseurs.
SU	Bâtiment de ventilation. Au Point 5, il s'agit d'un nouveau bâtiment construit en remplacement du bâtiment LEP qui devra être démonté pour faire place au bâtiment SX 5.
SUH	Bâtiments cryogénie abritant les compresseurs d'hélium pour le LEP.
SUX	Bâtiments de ventilation comprenant les unités de pulsion, traitement et conditionnement d'air ; de production de froid et récupération de chaleur de la zone traitée ; de ventilation et traitement de l'air d'extraction ; de production d'air comprimé.
SW	Bâtiments de service divers.
SX	Bâtiments des expériences. Ces bâtiments coiffent les grands puits desservant les halles d'expérimentation. Ils servent à abriter les puits et les halles souterraines précitées ainsi que les ponts roulants les desservant ; permettre le déchargement des composants des détecteurs, leur stockage provisoire ainsi que le montage de certains sous-ensembles ; abriter des petits ateliers de mécanique et d'électronique nécessaires au montage et à la maintenance de l'expérience.
SXC	Salles de commande et de comptage qui regroupent les instruments de contrôle des différents systèmes des détecteurs. C'est dans ces salles que travaillent les physiciens, ingénieurs et techniciens chargés d'assurer le fonctionnement des détecteurs. On trouve également, à proximité des salles de commande, un réfectoire et une salle de détente.
SXL	Bâtiment de montage des détecteurs.
SY	Bâtiments de contrôle d'accès aux différents sites non encore équipés et qui comprennent le bureau du gardien, des systèmes de contrôle à distance et une petite infirmerie.
SZ	Bâtiments surmontant les puits d'accès du personnel PZ.

Les bâtiments des expériences SX et les bâtiments de tête de puits SDX sont construits sur le principe d'une ossature en charpente métallique recouverte d'un bardage.

Les bâtiments comportant des appareillages bruyants (compresseurs, ventilateurs, etc.) sont eux construits en béton armé, l'ensemble comportant une isolation phonique spécifique (voir figure 8.7 à la page 316).

Ces diverses constructions sont réparties aux différents points autour de la circonférence du LHC et ont les caractéristiques décrites plus loin dans ce chapitre.

Le tableau 4.3 et le tableau 4.4 donnent le détail par point d'accès des bâtiments LEP qui sont réutilisés pour le LHC. La localisation des points d'accès est montrée dans la figure 2.6 à la page 29.

Lorsqu'il y a plusieurs bâtiments sous la même rubrique, seule la hauteur maximum est indiquée.

Pour la description détaillée des ouvrages existants, on pourra se référer à l'Annexe technique n° 2, "Rapport définitif de sûreté du LEP".

Tableau 4.3

Ouvrages existants aux Points 1 à 3.3

Type de bat.	Point 1		Point 1.8		Point 2		Point 3.2		Point 3.3	
	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)
SA					7,4	510				
SD	12,5	670	12,1	370	13,2	670	7,25	340		
SE	3,7	300			3,9	400	5,0	150	2,5	15
SF			3,9	43	15,0	600				
SG					4,8	260				
SH			11,0	1 175	9,4	837				
SLU			5,4	389	5,7	770				
SM			8,7	7 600						
SR	7,5	1 600			12,3	1 230	3,9	475		
SU	9,2	600			9,4	1 100	8,9	600		
SUH					9,4	550				
SUX					12,1	190				
SX					16,0	1 800	2,5	94		
SXL					12,8	1 500				
SY					3,1	70				
SZ									8,7	516
Sous-total		3 170		9 577		10 487		1 659		531

4 - Ouvrages à réaliser

Tableau 4.4 Ouvrages existants aux Points 4 à 8

Type de bat.	Point 4		Point 5		Point 6		Point 7		Point 8	
	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Surface (m ²)
SA					6,8	510				
SD	13,2	670	10	340	13,2	670	8,5	340	13,2	670
SE	3,8	300	5	150	3,9	400	3,9	150	3,8	300
SF	15	500			15	600			15	500
SG	4,7	260			4,7	260			4,7	260
SH	9,6	736			11,7	1 089			11,2	2 411
SLU	11,2	69			4,4	384			10,8	130
SM										
SR	7,4	660	3,9	475	12,3	970	3,9	475	9,7	660
SU	8,5	1 350	8,9	600	9,3	1 250	8,5	600	9,2	1 100
SUH	9,3	300			9,3	300			9,2	300
SUX									9,8	310
SX	16	1 100			16,1	1 100			16,1	1 100
SXL										
SY	3,1	70			3,3	70			3,3	70
SZ	8,4	334			9,4	107			9,6	99
Sous-total		6 349		1 565		7 710		1 565		7 910

4.1

Les ouvrages souterrains

Les ouvrages souterrains à construire sont montrés de manière schématique dans la figure 4.1. Il s'agit de :

- deux tunnels de transfert d'une longueur totale de 5 km
- deux halles souterraines de part et d'autre du Point 6 pour loger les absorbeurs de faisceaux

- deux nouvelles zones d'expérimentation pour les expériences ATLAS au Point 1 à Meyrin en Suisse et CMS au Point 5 à Cessy, plus quelques modifications mineures des zones d'expérimentation existantes aux Point 2 (Sergy) et 8 (Ferney-Voltaire) pour les expériences ALICE et LHC-B
- quelques autres modifications à apporter au tunnel LEP.

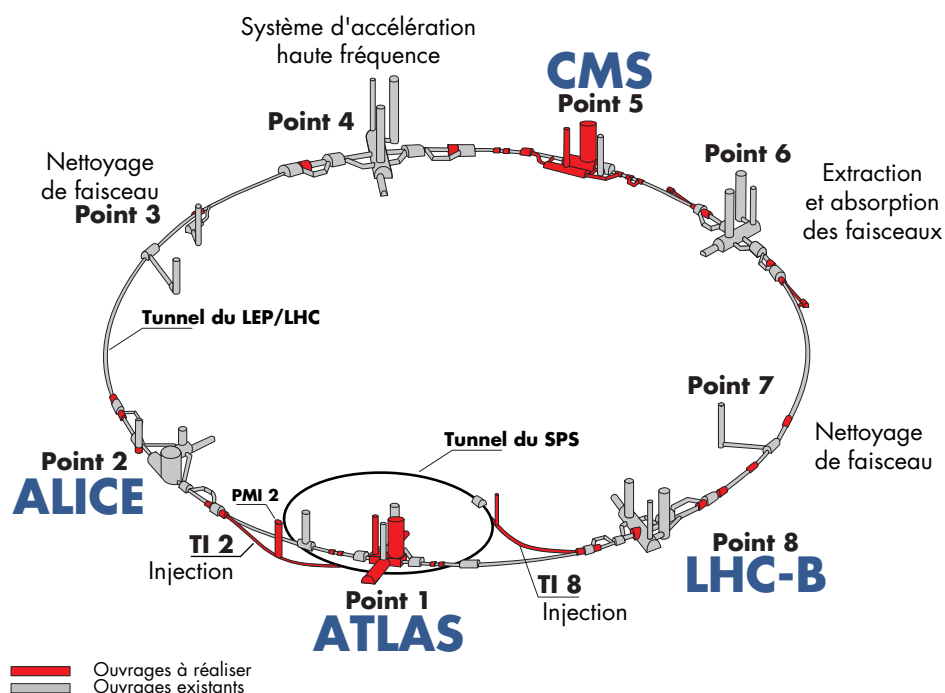


Figure 4.1

Vue d'ensemble des ouvrages souterrains du LHC

4.1.1

Les tunnels de transfert

Les protons pré-accélérés dans le SPS tournent dans le sens horaire. Pour disposer dans le LHC de faisceaux tournant dans le sens horaire et anti-horaire, deux tunnels de transfert sont nécessaires. Leur implantation est montrée sur les figures 4.2 et 4.5. Ils sont réalisés entièrement dans la molasse.

4.1.1.1

Tunnel de transfert TI 2

Ce tunnel, d'un diamètre intérieur de 3 m et d'une longueur de 2 650 m, relie un ouvrage souterrain existant situé sur le site du CERN à Meyrin (Suisse) à une chambre souterraine à construire sur le tunnel du LEP sous le territoire de la commune de Saint Genis-Pouilly à proximité du Point 2. Un puits ovale (PMI 2) de 18 m x 12 m de section et d'une profondeur de 51 m, situé sur le site de Meyrin, permet d'exécuter les travaux de génie civil et ultérieurement de

transférer les aimants de courbure de l'accélérateur jusqu'à leur lieu d'installation dans le tunnel principal.

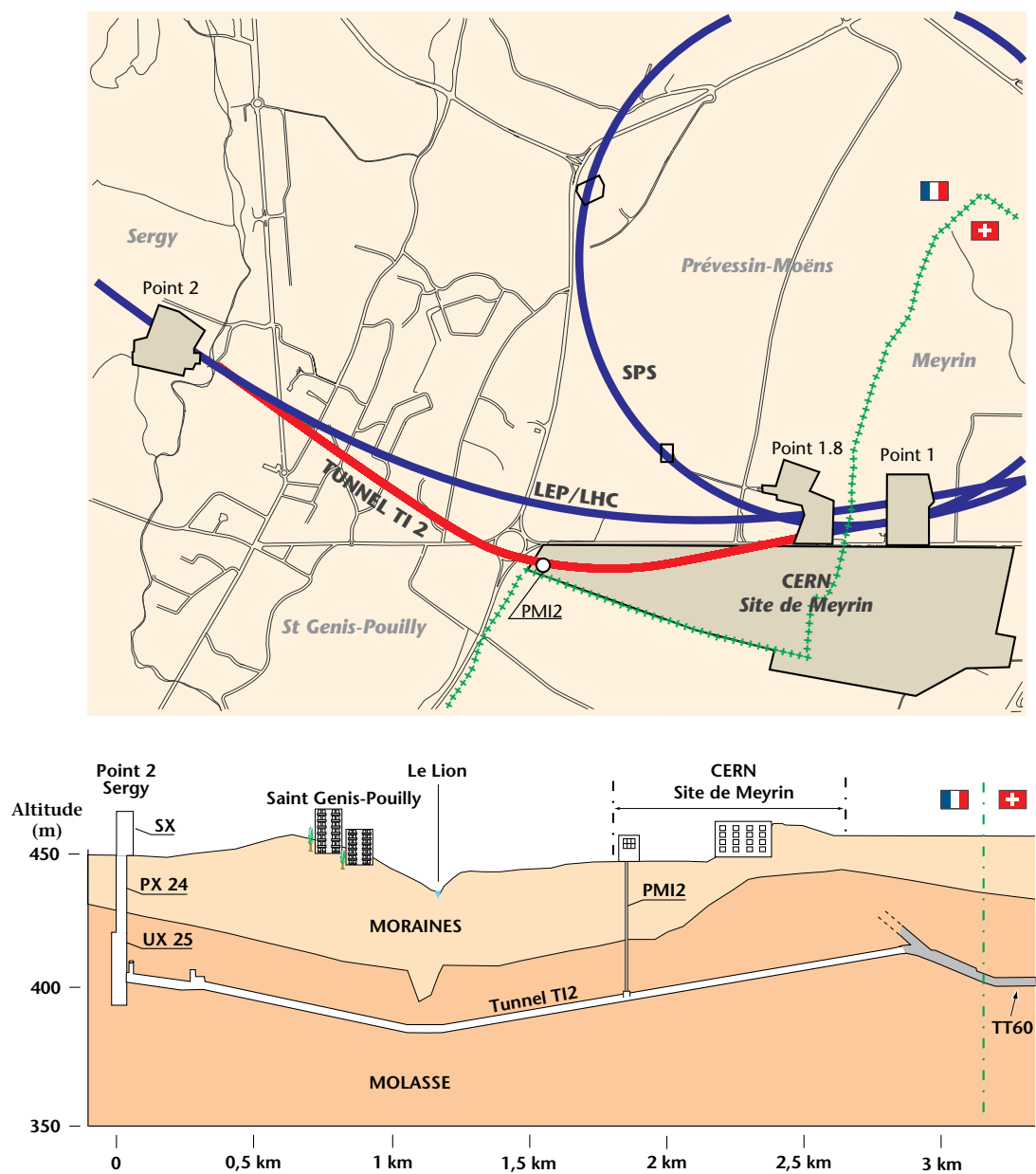


Figure 4.2 Plan de situation et profil longitudinal du tunnel de transfert TI 2

Tableau 4.5 Principaux ouvrages souterrains du tunnel TI 2

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
TI 2	2 650	3		17 030		
PMI 2	12	18	51	8 670		

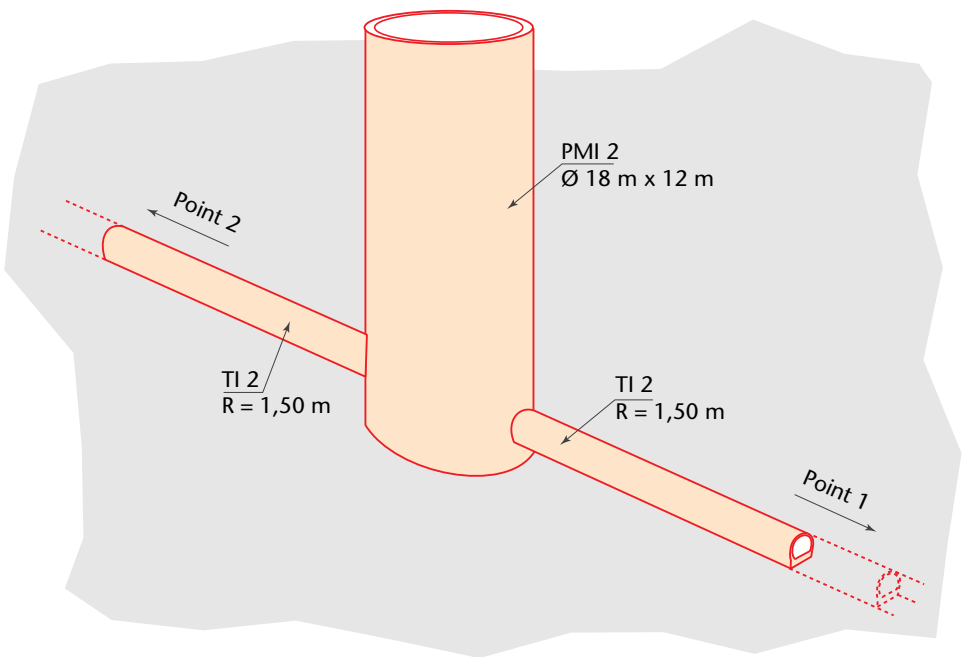


Figure 4.3 Les ouvrages souterrains autour du PMI 2

4.1.1.2

Tunnel de transfert TI 8

Ce tunnel a un diamètre intérieur de 3 m et une longueur de 2 380 m. Il relie un ouvrage souterrain existant au Point BA 4 du SPS (commune de Prévessin-Moëns) à une chambre souterraine à construire sur le tunnel du LEP et passe sous la commune de Meyrin (Suisse) à proximité du Point 8 du LHC. Son raccordement aux ouvrages existants se fait par l’intermédiaire de deux chambres dont le diamètre et la longueur sont respectivement de 4,40 m et 62 m, et 9 m et 35 m. Un puits de 9 m de diamètre au lieu-dit “La Bretonnière” à proximité immédiate du Point BA 4 du SPS permet d’exécuter les travaux de génie civil par l’intermédiaire d’un élargissement du tunnel TI8 d’un diamètre de 6,50 m et d’une longueur de 48 m.

Tableau 4.6

Principaux ouvrages souterrains du tunnel TI 8

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
PGC 8	9		50	3 180		
TI 81	62	4,4		870		
TJ 8	48	6,5		1 250		
TI 8	2 380	3		15 290		
TI 8/S4	105	3		680		

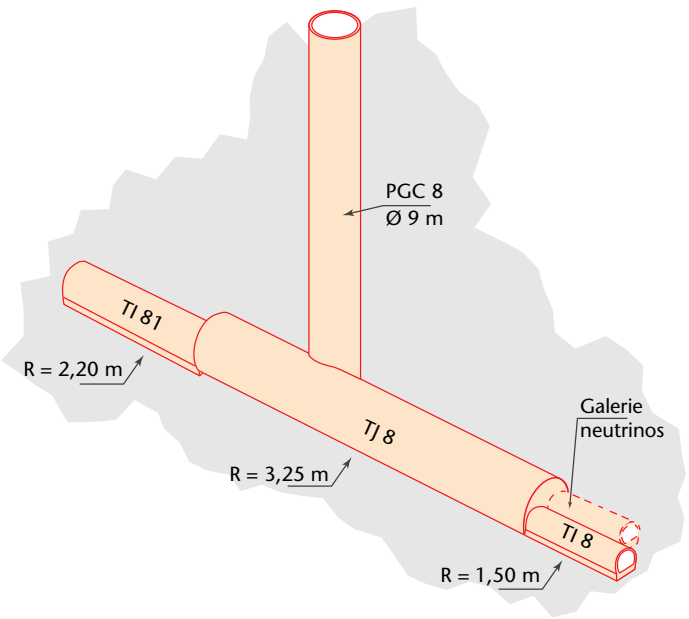


Figure 4.4

Les ouvrages souterrains autour du PGC 8

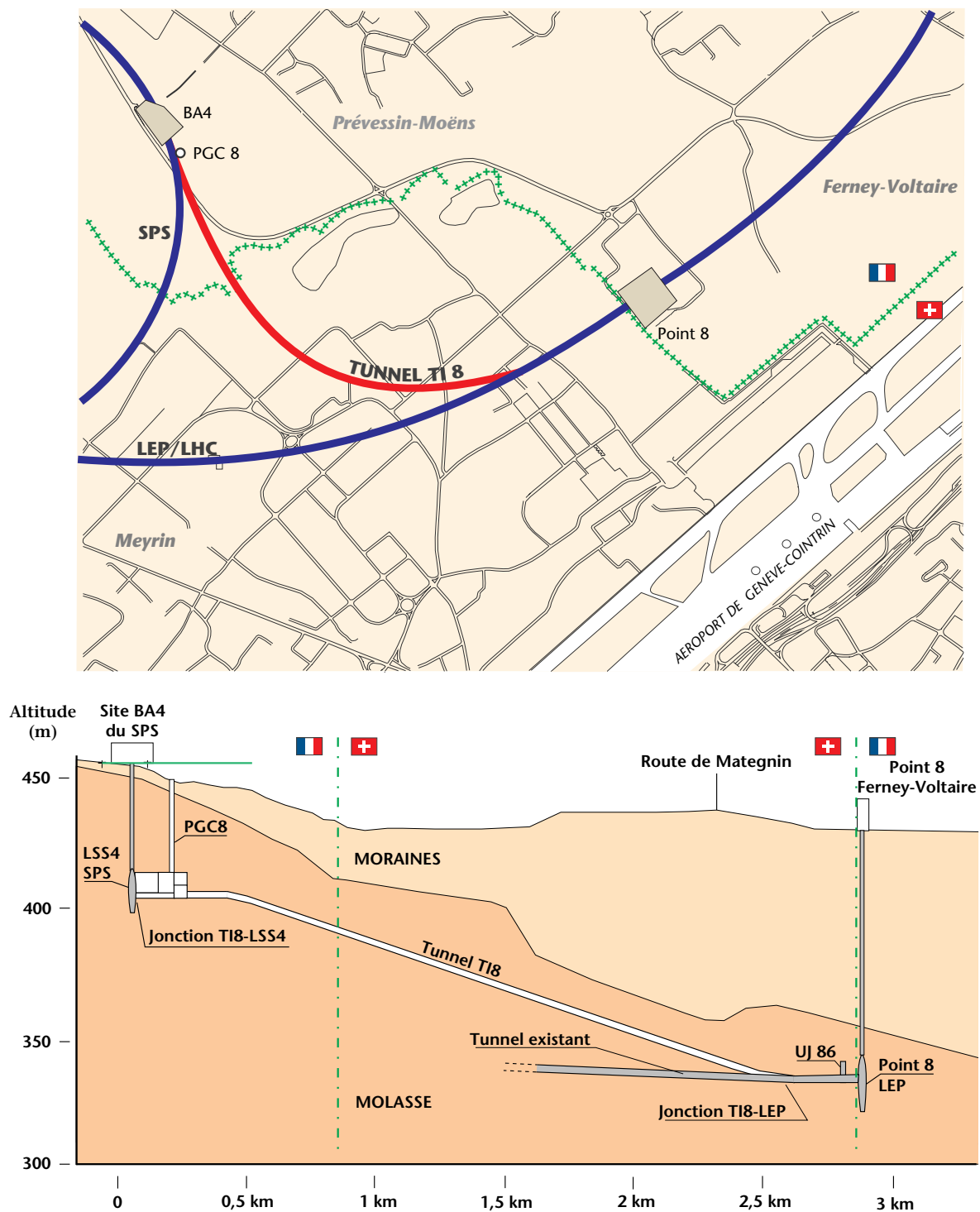


Figure 4.5 Plan de situation et profil longitudinal du tunnel de transfert T1 8

4.1.2**Les absorbeurs de faisceaux au Point 6**

Les faisceaux extraits de la machine avant un nouveau remplissage des anneaux sont envoyés dans des blocs absorbeurs. Ces blocs de graphite et d'acier de 11,3 m de long sont logés dans deux halles souterraines situées à 750 m de part et d'autre du Point 6.

Ce système nécessite la construction de part et d'autre du Point 6 d'un tunnel tangent à la circonférence de l'accélérateur et terminé par une halle souterraine (voir figure 4.6). Ces ouvrages, situés à une centaine de mètres de profondeur, entièrement dans la molasse sont creusés à partir du tunnel LHC après l'arrêt du LEP et ne sont donc pas reliés directement à la surface.

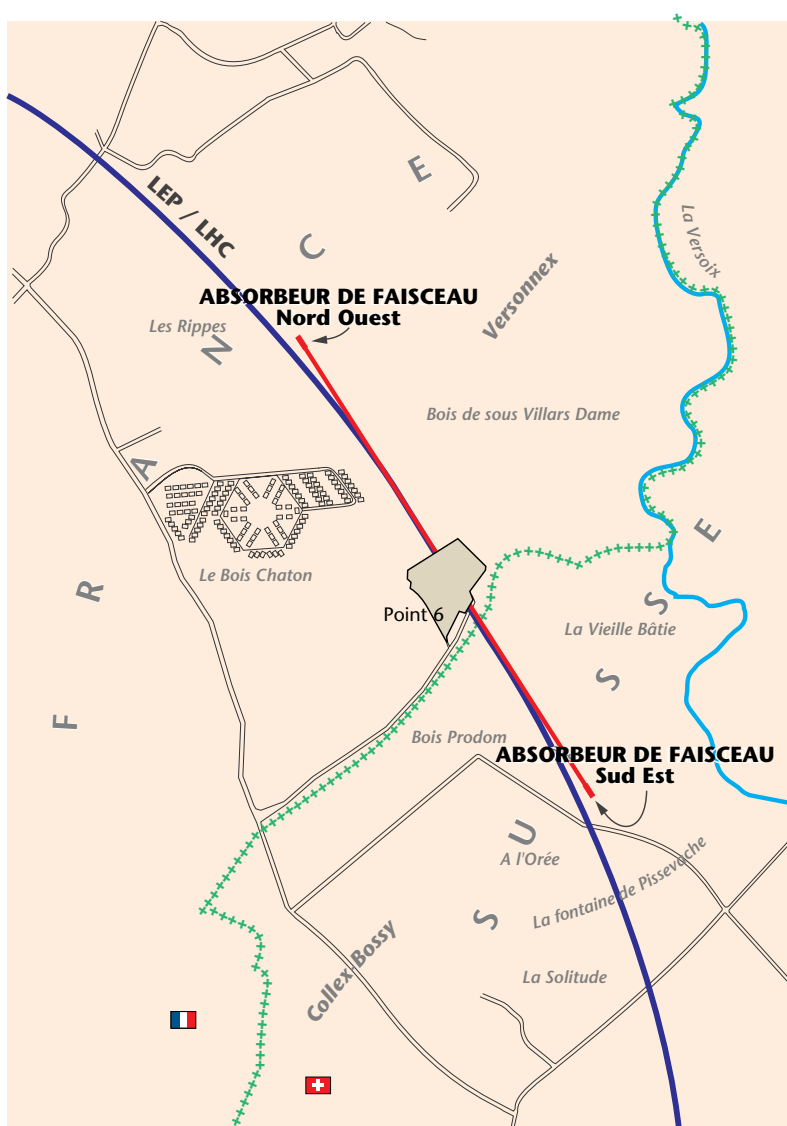


Figure 4.6

Situation générale des absorbeurs de faisceaux

4.1.2.1

La branche nord-ouest des absorbeurs de faisceaux (en France)

A 386 m du Point 6, une chambre de jonction (UJ 62) de 8 m de diamètre et de 40 m de longueur creusée autour de l'axe du tunnel principal sert d'aiguillage pour le nouveau tunnel. Ce dernier, d'un diamètre de 3 m et d'une longueur de 324 m se termine par une salle de 9 m de diamètre et de 25 m de longueur, elle-même connectée par un tunnel de secours de 2,20 m de diamètre et de 34 m de longueur au tunnel principal de l'accélérateur.

La salle de l'absorbeur de faisceaux est équipée d'un pont roulant de 30 tonnes et de systèmes de ventilation et de refroidissement en circuit fermé.

La figure 4.7 montre une vue en plan et une coupe verticale des ouvrages nécessaires pour l'absorption du faisceau côté nord-ouest.

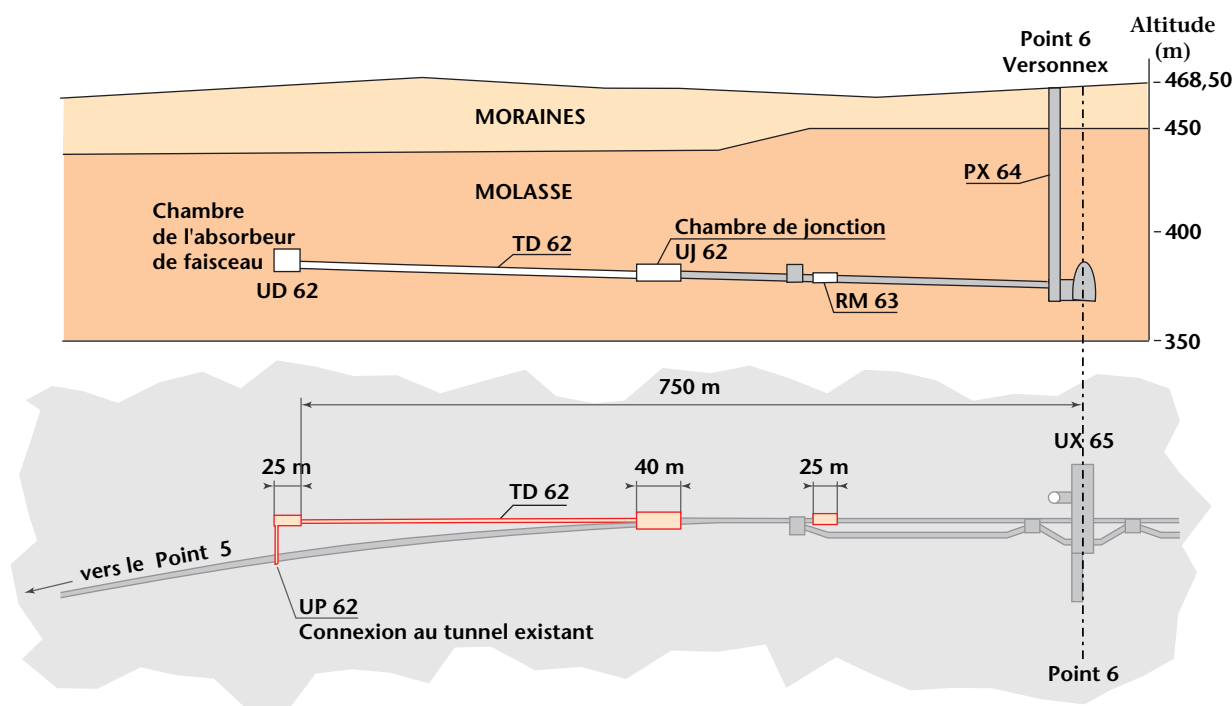


Figure 4.7

Absorbeur de faisceau : branche nord-ouest

4.1.2.2

La branche sud-est des absorbeurs de faisceaux (en Suisse)

Les ouvrages sont presque identiques à ceux de la branche nord-ouest avec les différences suivantes :

- la première chambre est située à 360 m du point d'intersection et a une longueur de 45 m ;
- le tunnel a une longueur de 345 m.

4 - Ouvrages à réaliser

L'ensemble des ouvrages de la branche sud-est se trouve sous le territoire de la commune de Collex-Bossy. La figure 4.8 montre une vue en plan et une coupe verticale des ouvrages nécessaires pour l'absorption du faisceau tournant dans le sens horaire.

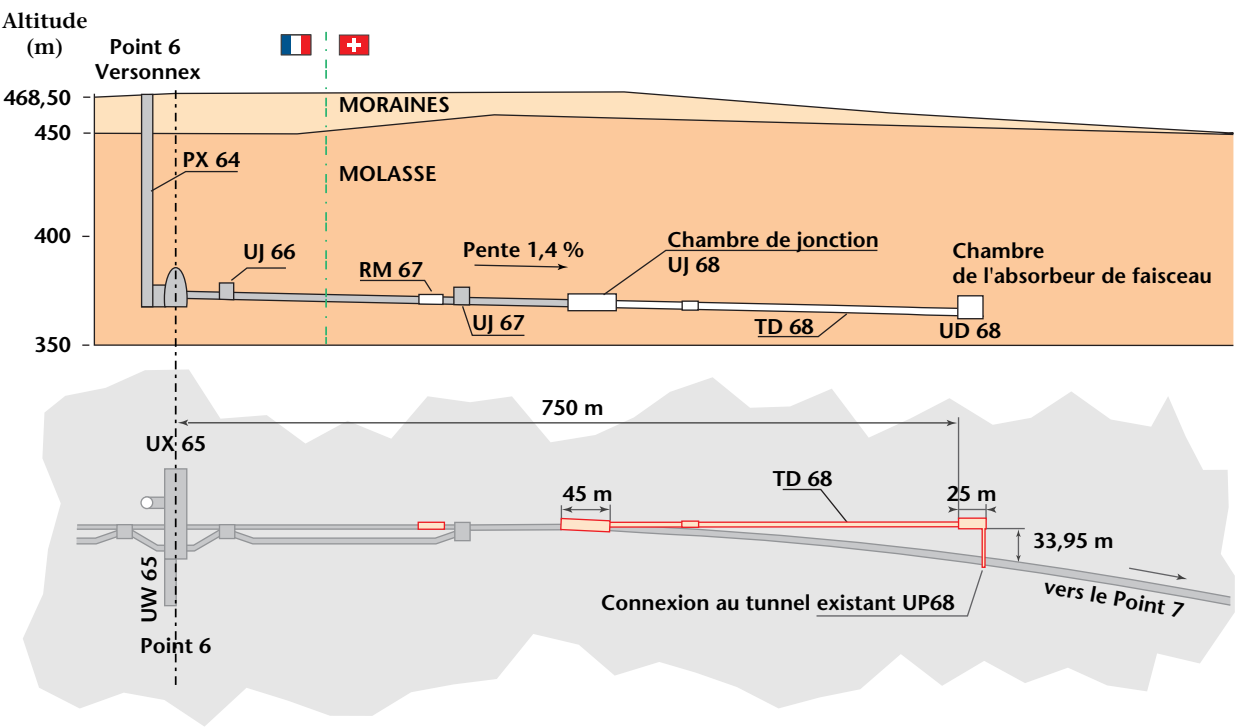


Figure 4.8

Absorbant de faisceau : branche sud-est

Tableau 4.7

Principaux ouvrages souterrains au Point 6

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
UD 62	25	9		1 490	30	6
UD 68	25	9		1 490	30	6
TD 62	324	3		2 080		
TD 68	345	3		2 220		
UJ 62	40	8		1 490		
UJ 68	45	8		1 670		

Tableau 4.7

Principaux ouvrages souterrains au Point 6 (suite)

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
RM 63	25	6,6		630		
RM 67	25	6,6		630		
UP 62	34	2,2		130		
UP 68	34	2,2		130		

4.1.3

Les zones d'expérimentation

Les expériences et leurs détecteurs ont été décrits au chapitre 3. Les ouvrages abritant ces détecteurs et leurs installations techniques annexes représentent de loin la partie la plus importante des travaux souterrains décrits ici. En effet, à elles seules, les deux zones d'expérimentation ATLAS au Point 1 et CMS au Point 5 représentent chacune plus du tiers de l'ensemble des travaux souterrains.

4.1.3.1

Point 1 : zone d'expérimentation ATLAS

La halle souterraine d'expérimentation (UX 15) abritant le détecteur a une longueur de 53 m, une largeur de 30 m et une hauteur de 34,90 m. Elle est creusée le long de l'axe du tunnel principal et est desservie depuis la surface par deux puits, respectivement de 18 m et de 12,60 m de diamètre. Elle est équipée de deux ponts roulants de 65 tonnes.

Une halle souterraine renfermant les équipements techniques (USA 15) liés au détecteur est située à proximité immédiate de la caverne expérimentale. Elle est longue de 62 m, large de 20 m et haute de 12,70 m. Elle est desservie depuis la surface par un puits existant de 9,10 m de diamètre et équipée d'un pont roulant de 10 tonnes.

Plusieurs galeries techniques (UL, UP) ou destinées à l'accès du personnel relient entre elles les deux halles souterraines. Leur diamètre respectif est de 3,80 m, 2,40 m et 2,20 m.

L'alimentation électrique des éléments magnétiques de l'accélérateur nécessite l'excavation de deux chambres souterraines (UR) de 5 m de diamètre et de 35 m de longueur. Ces chambres sont reliées au tunnel principal par deux bretelles de 2,50 m de diamètre et de 20 m de longueur. L'axe de l'ensemble est situé à 250 m du point d'interaction des faisceaux (voir figure 4.9).

4 - Ouvrages à réaliser

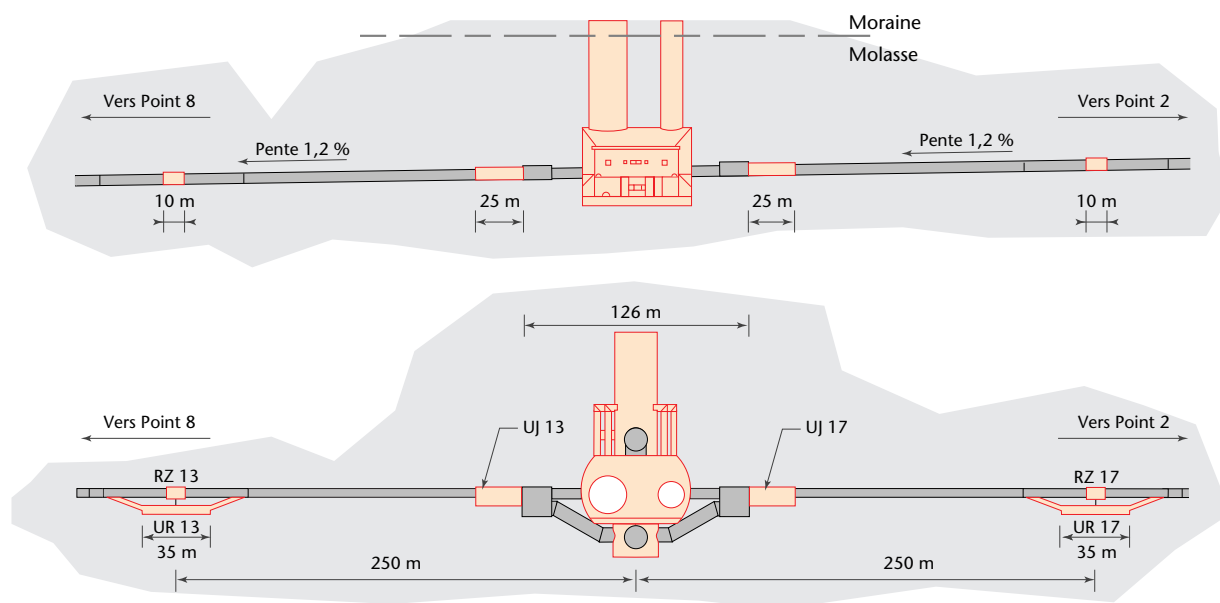


Figure 4.9

Profil longitudinal des ouvrages souterrains autour du Point 1

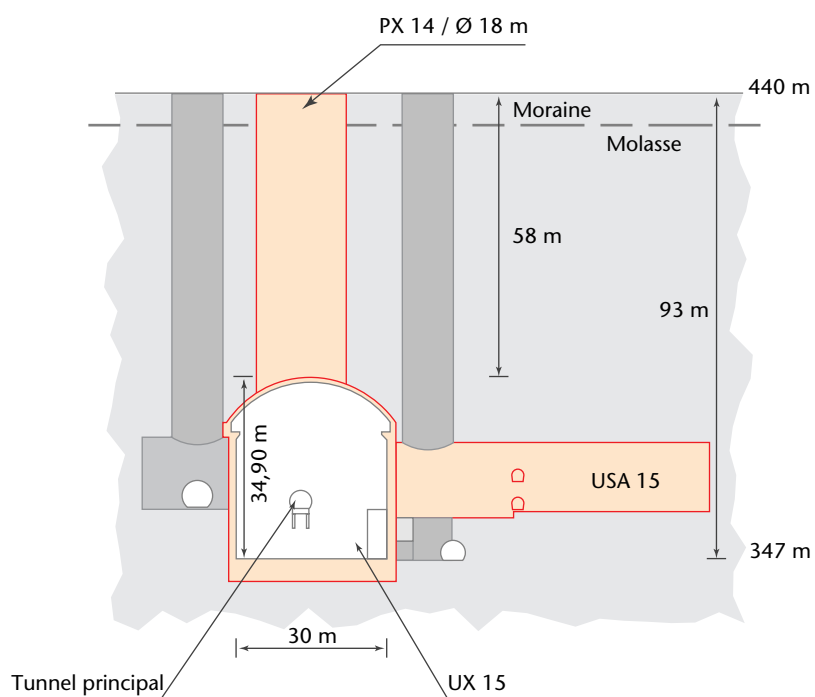


Figure 4.10

Zone d'expérimentation ATLAS : coupe verticale perpendiculaire à l'axe du tunnel

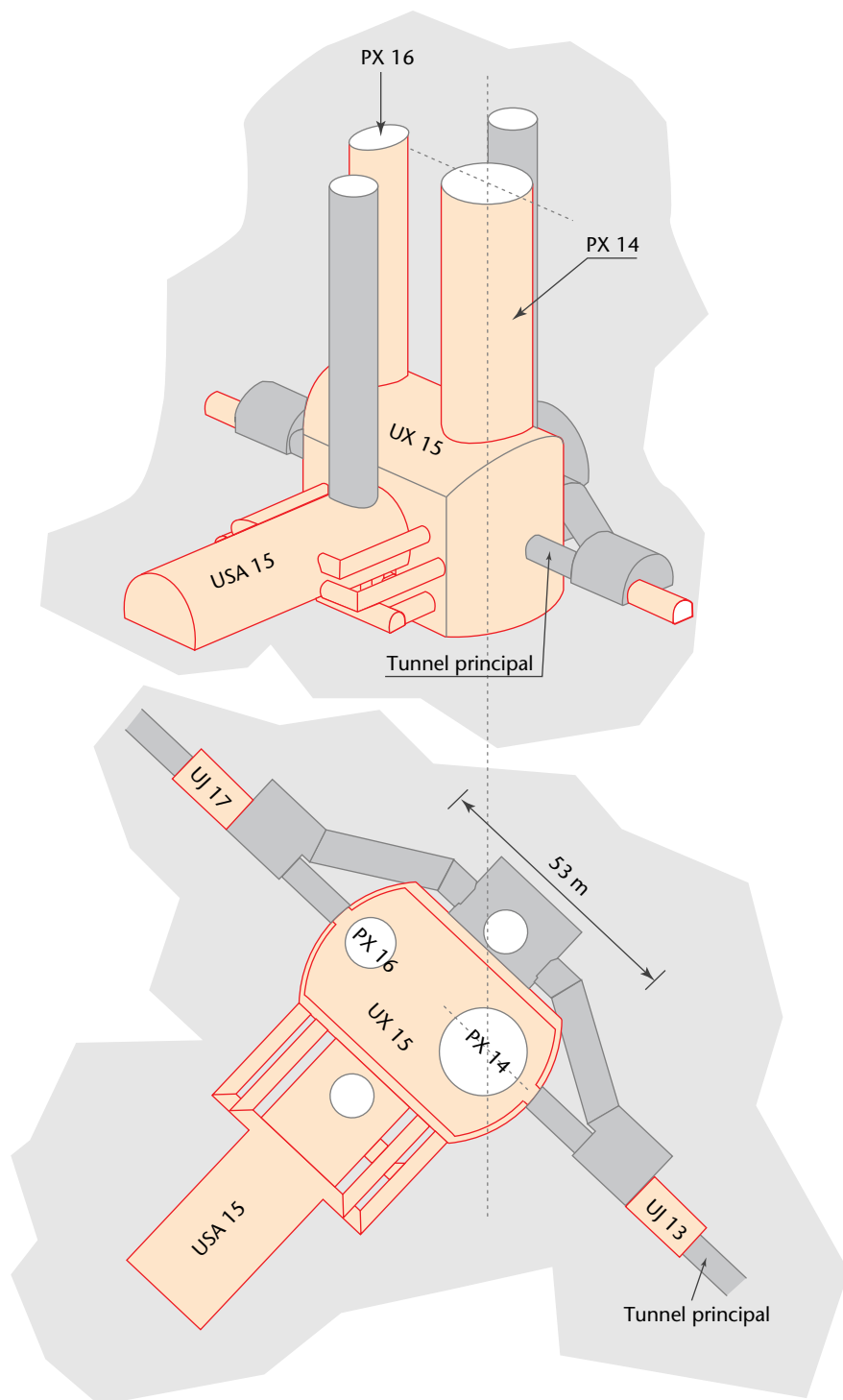


Figure 4.11

Point 1 : zone d'expérimentation ATLAS, vue axonométrique et vue en plan

Tableau 4.8

Principaux ouvrages souterrains au Point 1

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
PX 14	18		58	14 760		
PX 16	12,6		58	7 230		
RZ 13	10	5,5		240		
RZ 17	10	5,5		240		
UJ 13	25	9		1 020		
UJ 17	25	9		1 020		
ULX 14	30	2,4		120		
ULX 15	34	3,8		350		
ULX 16	30	2,4		120		
UP 12	20	2,5		140		
UP 13	20	2,5		140		
UP 17	20	2,5		140		
UP 18	20	2,5		140		
UPX 14	34	2,2		130		
UPX 16	34	2,2		130		
UR 13	35	5		490		
UR 17	35	5		490		
USA 15	62	20	12,7	15 000	10	8
UX 15	53	30	34,9	47 000	2 × 65	24,6

4.1.3.2

Zone d'expérimentation ALICE au Point 2

Le détecteur ALICE réutilise pour l'essentiel les ouvrages souterrains construits pour l'expérience L3 du LEP. Seule une galerie technique et d'accès au personnel, d'un diamètre de 3,80 m et d'une longueur de 32 m est à réaliser entre la base du puits existant PGC 2, dont le fond est à modifier, et la halle d'expérimentation. Les autres constructions, liées au fonctionnement du

collisionneur, ont été décrites précédemment dans les paragraphes 4.1.4.1 et 4.1.4.3.

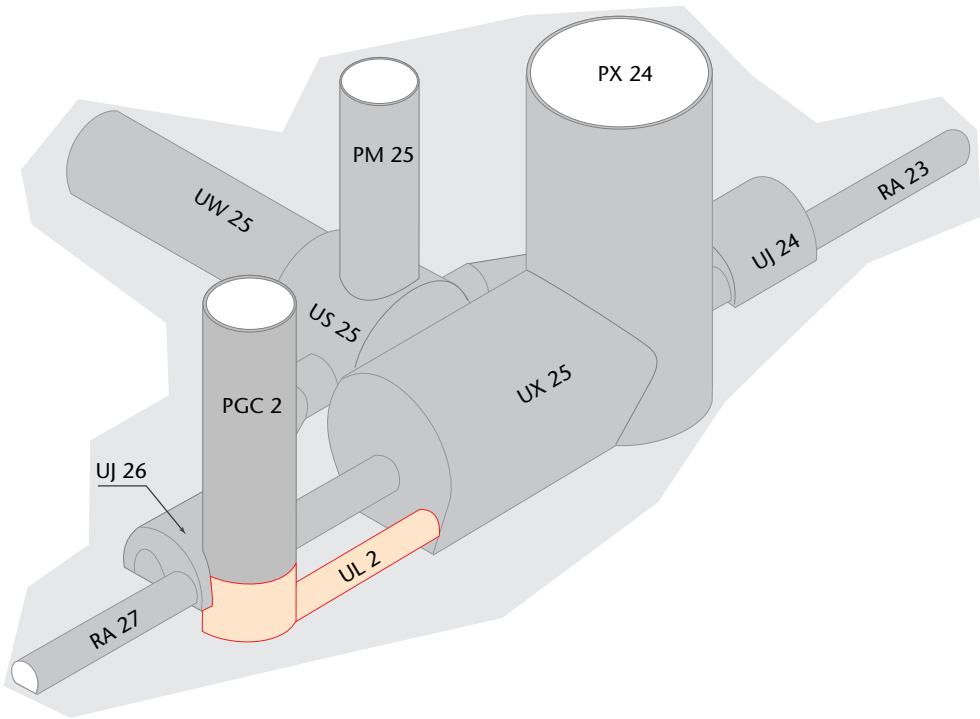


Figure 4.12 Ouvrages souterrains de la zone d'expérimentation ALICE

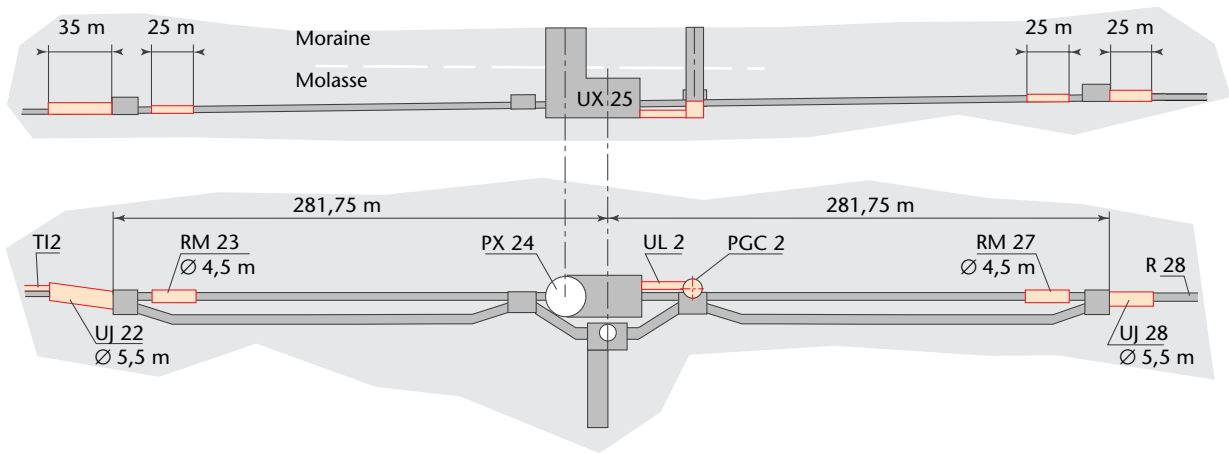


Figure 4.13 Profil longitudinal des ouvrages souterrains autour du Point 2

Tableau 4.9

Principaux ouvrages souterrains au Point 2

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
PGC 2	11		81 ^a	1 250		
UJ 22	35	9		1 430	20	3
UJ 28	25	9		1 020		
UL 2	32	3,8		330		
RM 23	25	6,6		630		
RM 27	25	6,6		630		

a. Hauteur PGC 2 existant = 69 m

4.1.3.3

Zone d'expérimentation CMS au Point 5

La halle souterraine d'expérimentation (UX 55) abritant le détecteur a une longueur de 53 m et un diamètre de 26,5 m. Elle est creusée autour de l'axe du tunnel principal et desservie depuis la surface par un puits (PX 56) de 20,40 m de diamètre. Elle est équipée de deux ponts roulants de 20 tonnes.

Une halle renfermant les équipements techniques liés au détecteur (US 55) est située à proximité immédiate de la zone d'expérimentation. Elle a une longueur de 85 m et un diamètre de 18 m. Elle est desservie depuis la surface par un puits de 12 m de diamètre (PM 54) et est équipée d'un pont roulant de 10 tonnes.

Cette halle technique est raccordée, par l'intermédiaire de deux tunnels (UL) d'un diamètre de 3,80 m et d'une longueur cumulée de 125 m, à deux chambres (UJ) plus petites (diamètre : 8,50 m ; longueur : 20 m) situées autour de l'axe du tunnel principal à respectivement 116 m et 82 m du point d'intersection entre les faisceaux.

Plusieurs galeries techniques (UP) ou destinées à l'accès du personnel relient entre eux les trois ouvrages décrits ci-avant. Leur diamètre respectif est de 3,80 m, 2,50 m et 2,20 m.

Tableau 4.10

Principaux ouvrages souterrains au Point 5

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
PM 54	12		80	9 050		
PX 56	20,4		76	24 830		
RZ 53	10	5,5		240		
RZ 57	10	5,5		240		
UJ 53	20	8,5		540		
UJ 57	20	8,5		540		
UL 54	70	3,8		720		
UL 56	55	3,8		570		
UP 52	20	2,5		140		
UP 54	20	2,5		140		
UP 56	18	2,2		70		
UP 57	10	2,5		140		
UP 58	10	2,5		140		
UPX 56	16	2,2		60		
UR 53	35	5		500		
UR 57	35	5		500		
US 55	85	18	11,5	15 000	10	8
UX 55	53	26,5	24	28 000	2 × 20	17,5

Comme au Point 1, l'alimentation électrique des éléments magnétiques de l'accélérateur nécessite l'excavation de deux chambres souterraines (UR) de 5 m de diamètre et de 35 m de longueur située à 250 m du point d'interaction entre les faisceaux et reliée au tunnel principal par deux bretelles de 2,50 m de diamètre et de 20 m de longueur.

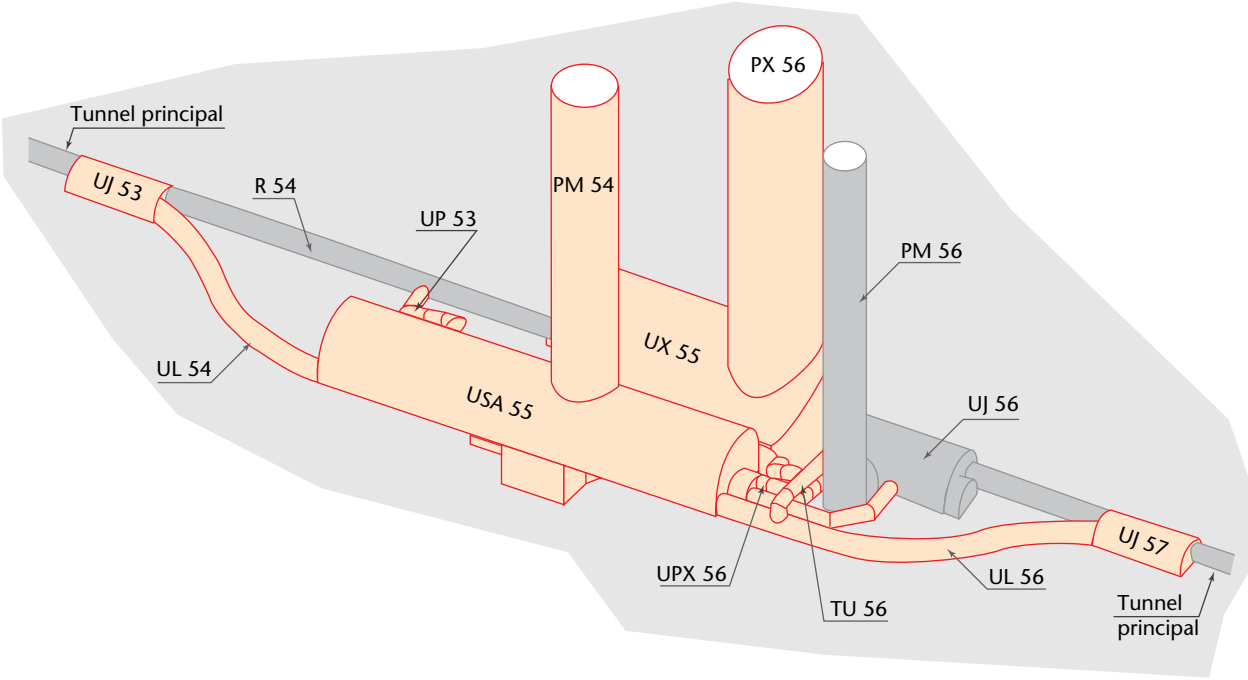


Figure 4.14 Ouvrages souterrains de la zone d'expérimentation CMS

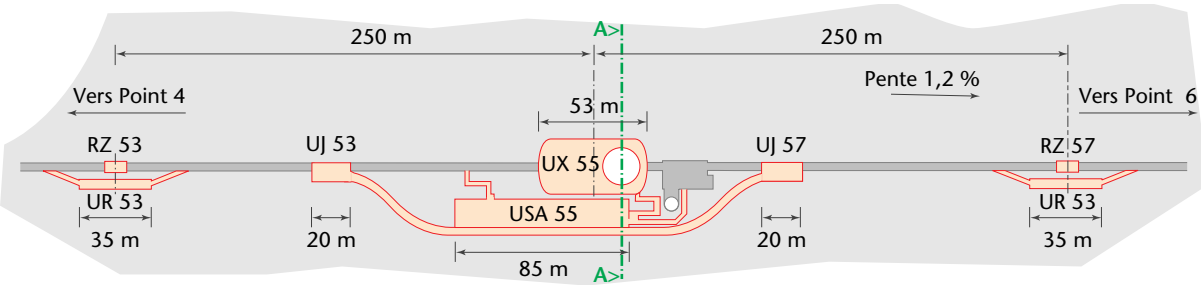


Figure 4.15 Vue en plan de la zone d'expérimentation CMS

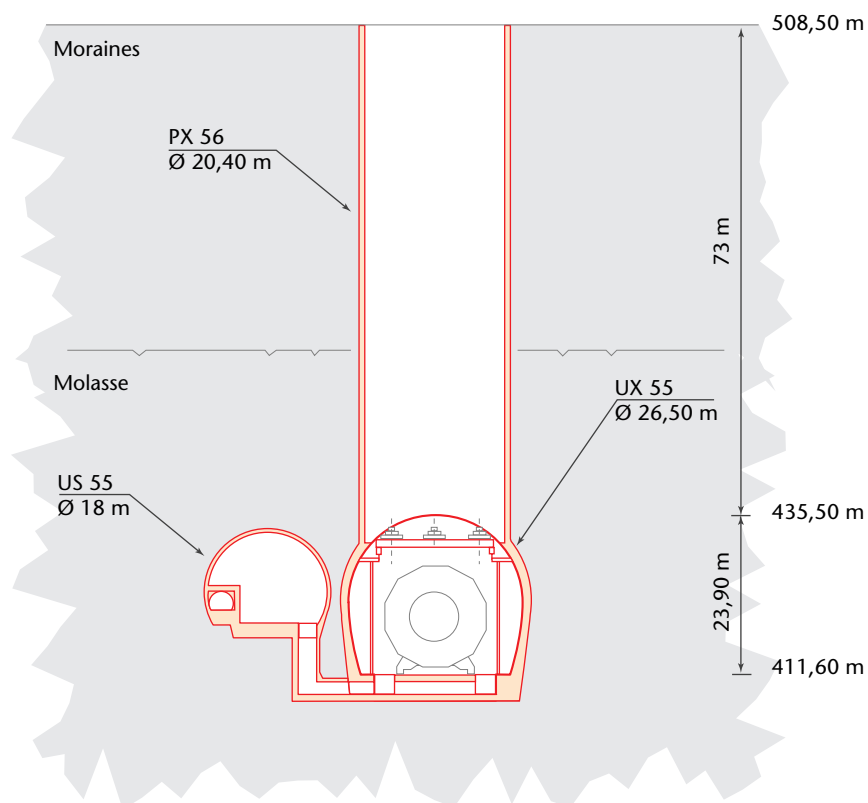


Figure 4.16

Coupe verticale suivant l'axe A-A ¹ de la zone d'expérimentation CMS

4.1.3.4

Zone d'expérimentation LHC-B au Point 8

Le détecteur LHC-B réutilise pour l'essentiel les ouvrages souterrains construits pour l'expérience DELPHI du LEP. Seule une alcôve d'un diamètre de 15 m et d'une longueur de 10 m (UX 86) est à réaliser. Elle est concentrique au tunnel principal et fait partie de la halle d'expérimentation.

Les figures 4.17 et 4.18 montrent en élévation et en plan les ouvrages existants qui seront utilisés par LHC-B et leurs modifications éventuelles. Les autres constructions, liées au fonctionnement du collisionneur, ont été décrites précédemment dans les paragraphes 4.1.4.1 et 4.1.4.3.

1. Voir figure 4.15 à la page 98

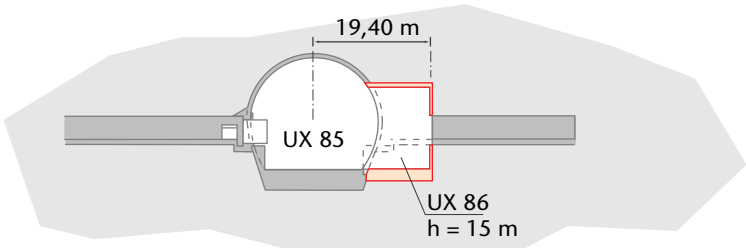


Figure 4.17 Ouvrages souterrains au Point 8 : vue en coupe

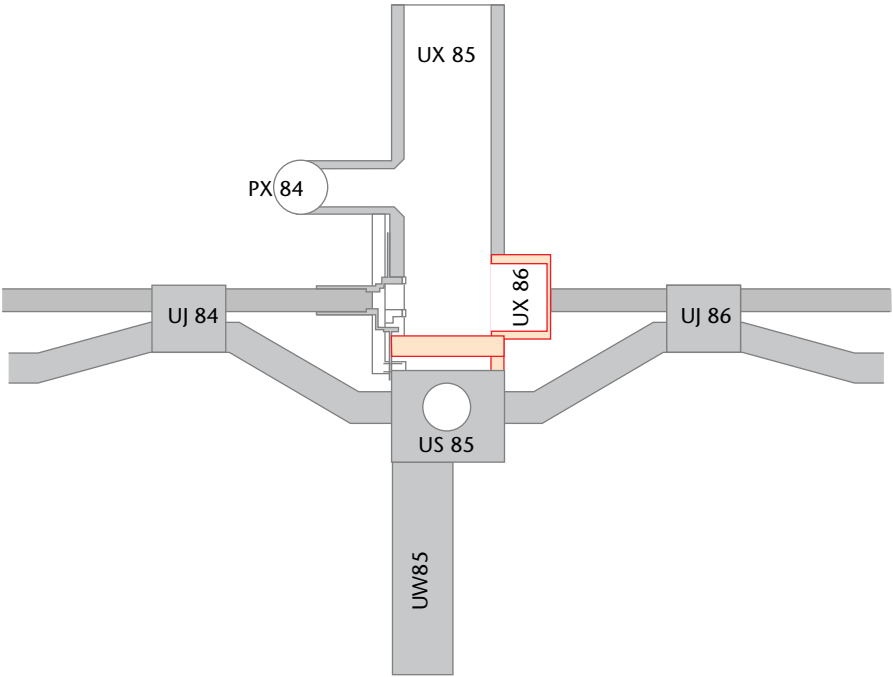


Figure 4.18 Ouvrages souterrains au Point 8 : vue en plan

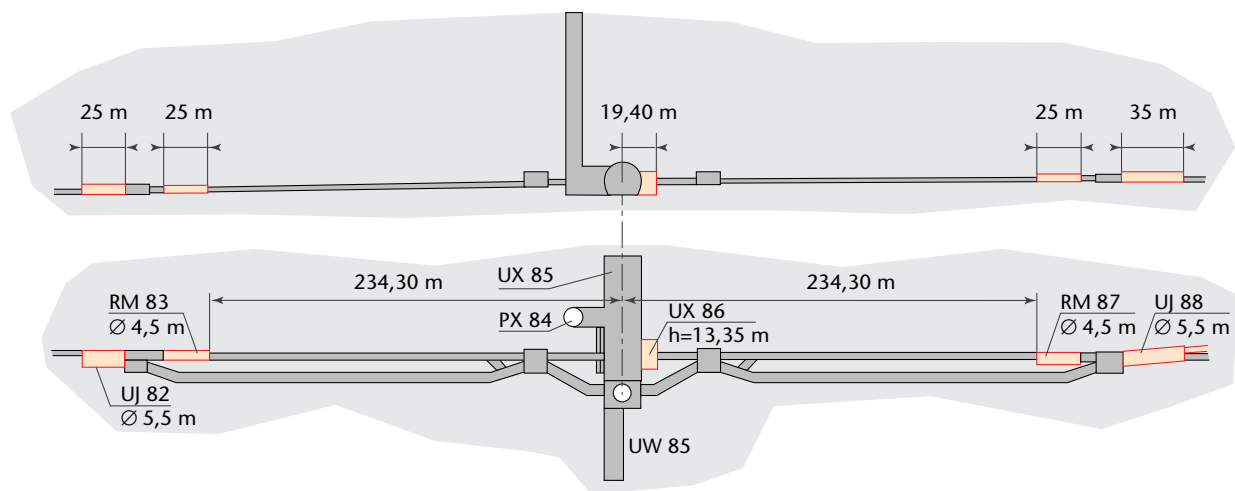


Figure 4.19 Profil longitudinal des ouvrages souterrains autour du Point 8

Tableau 4.11

Principaux ouvrages souterrains au Point 8

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
UJ 82	25	9		1 020		
UJ 88	35	9		1 430	20	3
RM 83	25	6,6		630		
RM 87	25	6,6		630		
UX 86	10	15		1 800		

4.1.4

Les autres modifications des ouvrages de l'accélérateur

Un certain nombre de modifications de moindre importance sont nécessaires pour adapter le tunnel du LEP et ses ouvrages annexes à leur nouvelle destination.

4.1.4.1

Chambres souterraines pour le passage des dipôles (UJ)

Le transport des aimants de courbure depuis le pied du puits PMI 2 jusqu'à leur emplacement dans l'accélérateur nécessite, à certains endroits, l'élargissement du tunnel principal. Il s'agit de la création de chambres souterraines d'un

diamètre de 9 m et d'une longueur de 25 ou 35 m de part et d'autre des points d'intersection 1, 2 et 8, à une distance de 280 m de ceux-ci (distance réduite à 63 m pour le Point 1).

4.1.4.2

Elargissement du tunnel pour l'alimentation électrique (RZ)

L'alimentation électrique des aimants provenant des convertisseurs de puissance nécessite l'installation de boîtes de raccordement dans le tunnel principal. La dimension de ces boîtes demande la création de chambres concentriques au tunnel principal d'un diamètre de 5,50 m et d'une longueur de 10 m de part et d'autre des Points 1, 5 et 7, à une distance de 232 m de ceux-ci.

Au Point 7, la chambre souterraine est reliée au tunnel principal par deux bretelles de 2,50 m de diamètre et de 20 m de longueur. Ces ouvrages sont situés sous le territoire de la commune de Collex-Bossy, en Suisse. Il est prévu d'exécuter ces travaux d'excavation depuis les ouvrages existants. Si cela n'était pas possible, un puits de 6 m de diamètre serait nécessaire.

Au Point 3, il n'est pas nécessaire d'effectuer des travaux souterrains dans le calcaire pour loger les nouvelles installations électriques car la chambre souterraine existante (UJ 33) peut être réutilisée telle quelle.

Tableau 4.12

Principaux ouvrages souterrains au Point 7

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
PGC 7^a	6		40	1 130		
RZ 74	10	5,5		240		
RZ 77	10	5,5		240		
UP 74	20	2,5		180		
UP 76	20	2,5		180		
UR 75	40	5		560		

a. Eventuellement au Point 7.2 à Collex-Bossy

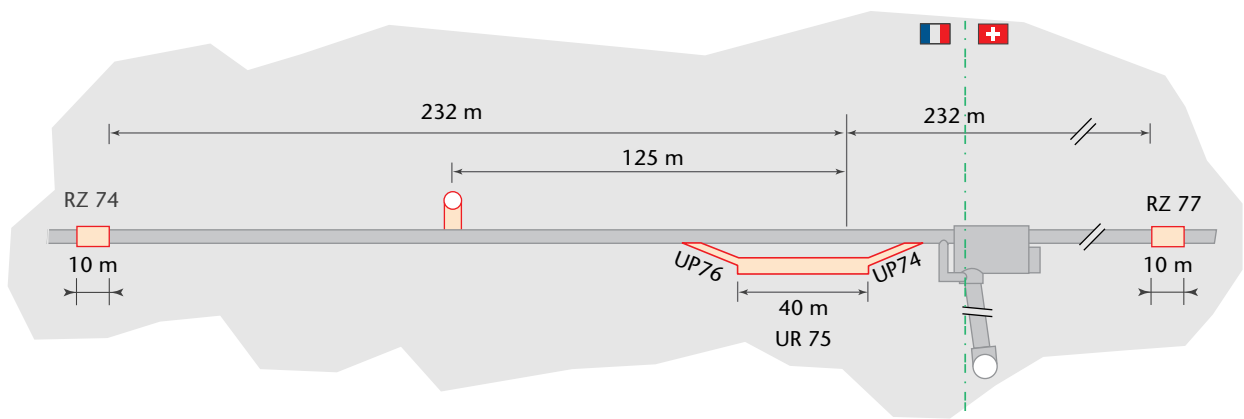


Figure 4.20 Les ouvrages souterrains au Point 7

4.1.4.3

Elargissements du tunnel pour les aimants de référence (RM)

La mise en place d’aimants de référence, servant au réglage fin du champ magnétique des aimants de l’accélérateur, nécessite l’élargissement du tunnel principal par la création d’une chambre d’un diamètre de 6,60 m et d’une longueur de 25 m de part et d’autre de tous les points pairs, à une distance de 234 m de ceux-ci. Ces ouvrages sont présentés avec les zones d’expérimentation pour les Points 2 et 8, avec les absorbeurs de faisceaux pour le Point 6, et dans le tableau 4.13 pour le Point 4.

Tableau 4.13

Ouvrages souterrains au Point 4

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
RM 43	25	6,6		630		
RM 47	25	6,6		630		

4.2

Les ouvrages de surface

Les nouveaux bâtiments à construire (29 000m²) peuvent être répartis en deux grandes catégories : les bâtiments construits entièrement en béton et les bâtiments à ossature et bardage métalliques.

Les bâtiments construits en béton sont destinés à recevoir des appareillages bruyants, tels que les compresseurs pour la cryogénie et la ventilation. Ils sont

conçus pour limiter la transmission sonore vers l'extérieur, notamment par leurs diverses ouvertures et accès (souches de ventilation, portes, etc.). Cette conception, utilisée pour les bâtiments LEP, a été perfectionnée grâce à l'expérience acquise. Elle est illustrée dans la figure 8.7.

Les bâtiments à ossature et bardage métalliques sont essentiellement les halls qui coiffent les puits d'accès aux installations souterraines. Ils n'abritent pas d'installations bruyantes et servent notamment à la manutention, au stockage et au transfert d'équipements entre la surface et le tréfonds. Leur construction consiste en une structure de base en béton sur laquelle s'appuie une superstructure métallique. Cette superstructure supporte des parois constituées d'un double bardage en acier prélaqué ainsi qu'une toiture en acier avec ses dispositifs d'isolation et d'étanchéité.



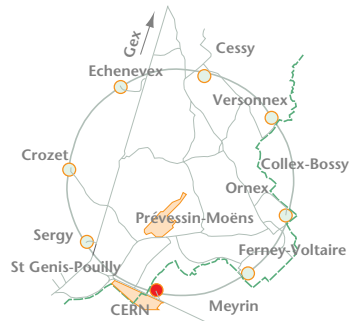
Figure 4.21

Exemples de bâtiments existants à ossature métallique et en béton

En outre, des zones de stockage d'hélium (SHE) sont aménagées. En effet, lorsque les aimants supraconducteurs ne sont plus refroidis, lors d'une intervention ou de l'arrêt annuel, il faut stocker l'hélium sous forme gazeuse. Ce stockage est effectué aux divers points dans des réservoirs de 3,20 m de diamètre et de 28 m de long. Les réservoirs sont pour la plupart groupés par modules de six et disposés sur deux niveaux.

4.2.1

Les ouvrages de surface au Point 1 à Meyrin (Suisse)



Les bâtiments au Point 1 sont essentiellement destinés à l'expérience ATLAS pour le montage et la maintenance de l'ensemble de détecteurs, la ventilation des salles souterraines et les installations cryogéniques.



Figure 4.22

Vue aérienne du Point 1

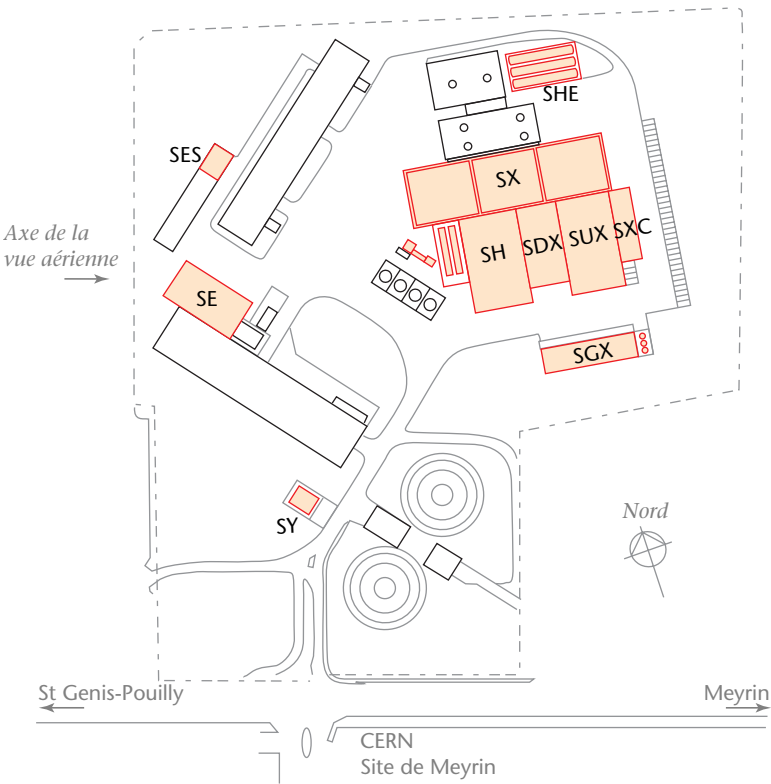


Figure 4.23 Plan de masse des ouvrages de surface au Point 1

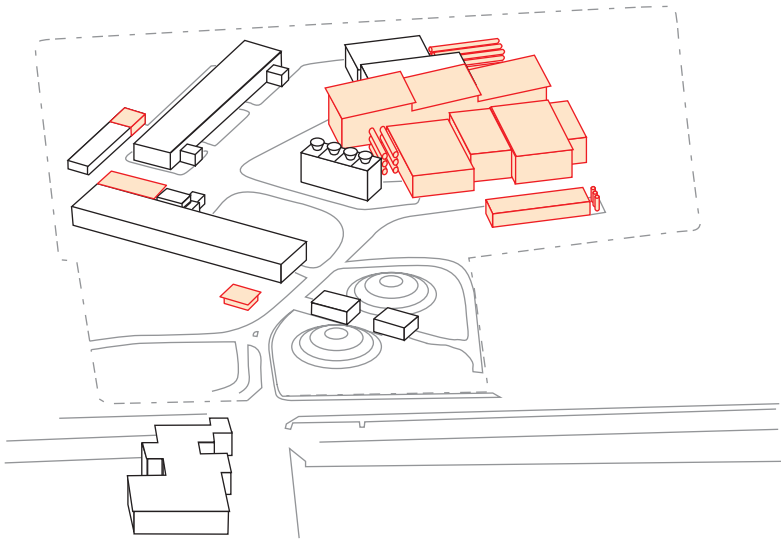
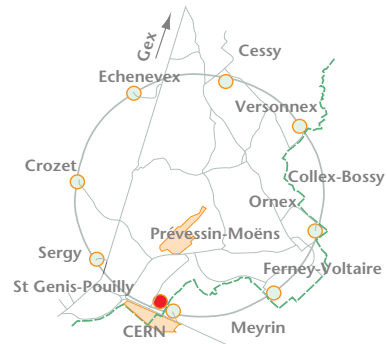


Figure 4.24 Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 1

Tableau 4.14 Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 1

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SDX	34	17	12	578	10	9
SE	35	20		700		
SES	12	10	4	120		
SGX	40	10	4	400		
SH	40	25	9	1 000	20	6
SHE	32	16		512		
SUX	40	23	13	920	8	7
SX	84	24	17,7	2 016	280	9,3
SXC	30	8	11	240		
SY	11	9	3	99		

a. Surface totale des bâtiments (hors SHE) = 6 073 m²

4.2.2**Les ouvrages de surface au Point 1.8 à Prévessin-Moëns**

Il s'agit de construire un bâtiment d'assemblage des aimants de l'accélérateur (SMA) d'une surface de 4 500 m² à proximité du bâtiment existant SM 18 et relié à celui-ci par un abri de déchargement (SMB).

Le bâtiment de tête de puits (SD) existant est agrandi. Un bâtiment destiné à recevoir des compresseurs cryogéniques (SHM) et des tours de refroidissement (SF) ainsi qu'un bâtiment de service annexe (SW) sont construits après déboisement d'une surface d'environ 1 000 m².

De plus, une grande plate-forme de stockage d'hélium gazeux (SHE) de 115 x 38 m est aménagée. Elle est destinée à recevoir 48 réservoirs d'hélium d'un volume de 250 m³ sous une pression maximum de 2 MPa et représente le stockage central d'hélium de l'accélérateur.

**Figure 4.25****Vue aérienne du Point 1.8**



Figure 4.26

Plan de masse des ouvrages de surface au Point 1.8

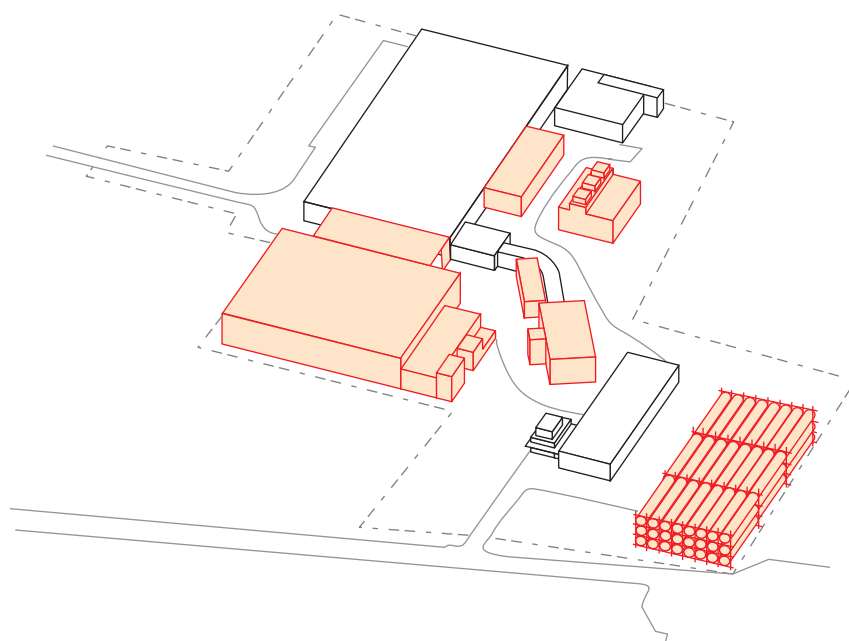


Figure 4.27

Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 1.8

4 - Ouvrages à réaliser

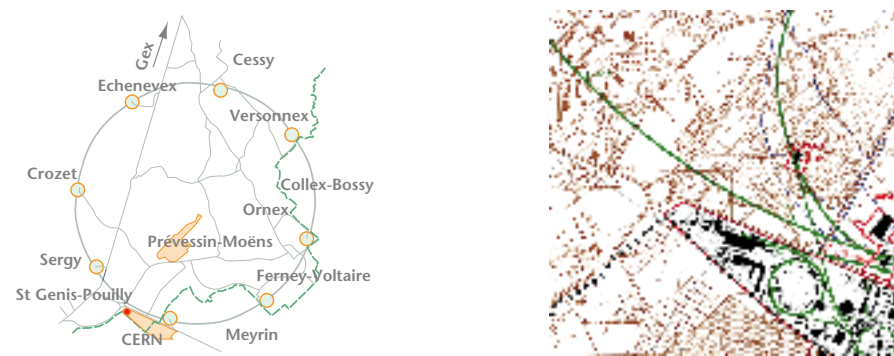
Tableau 4.15

Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 1.8

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SHE 1	32	12		384		
SD	38	18	13	684	10	9
SF	28	23	16	644	3,2	7
SHE	115	38		4 370		
SHM	45	15	9	675	20	6
SMA	75	60	9	4 500	40	6,5
SMB	50	25	9	1 250	40	6,5
SW	48	15	9	720		6

a. Surface totale des bâtiments (hors SHE) = 8 473 m²

4.2.3 Les ouvrages de surface au PMI 2 sur le site de Meyrin



On construit un hall de montage et de stockage des aimants de courbure de l'accélérateur avant leur installation dans le tunnel (SMI 2) et un bâtiment (SDI 2) coiffant le puits (PMI 2) de transfert de ces mêmes aimants.



Figure 4.28 Vue aérienne du site du PMI 2

Tableau 4.16 Caractéristiques des ouvrages de surface au PMI 2

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SMI 2	60	35	11,8	2 100	40 + 10	8
SDI 2	22	20	11,8	440	40	8

a. Surface totale des bâtiments = 2 540 m²

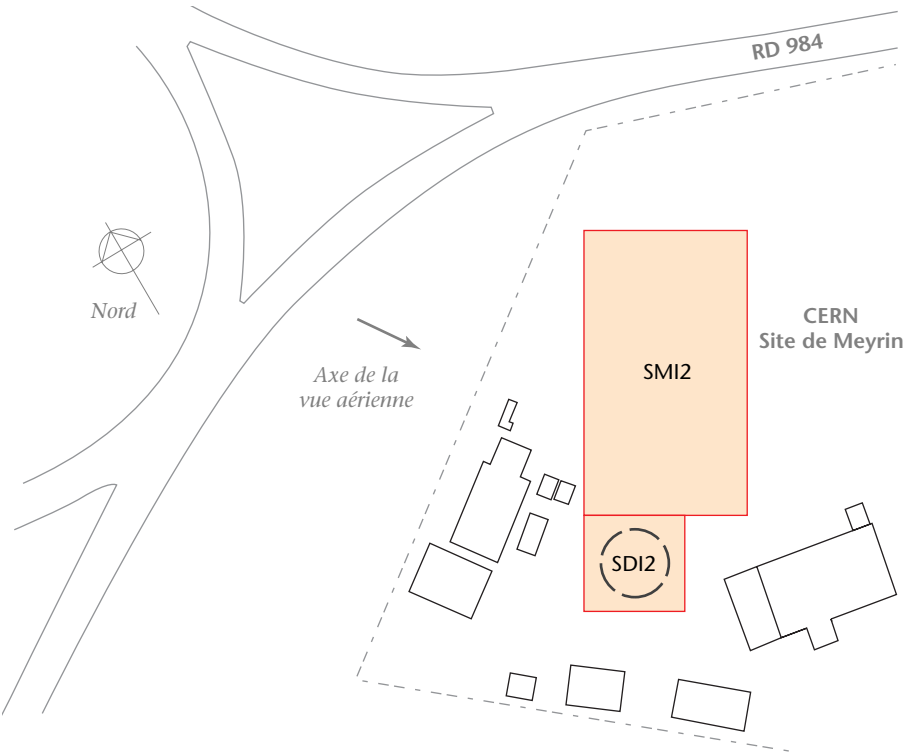


Figure 4.29 Plan de masse des ouvrages de surface au PMI 2

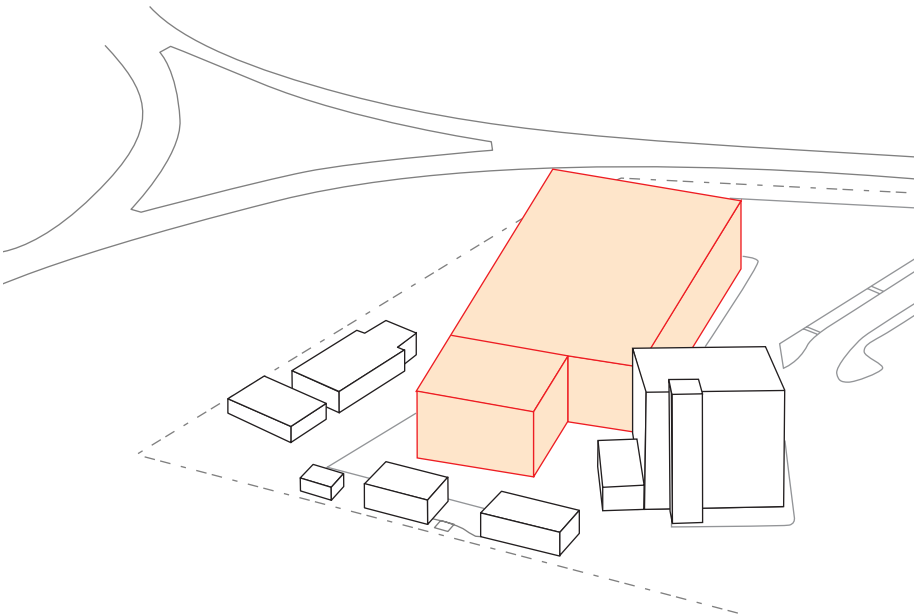
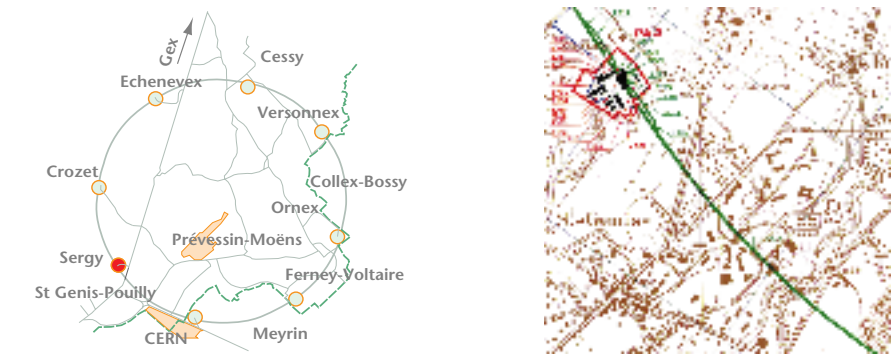


Figure 4.30 Vue axonométrique des ouvrages de surface au PMI 2

4.2.4 Les ouvrages de surface au Point 2 à Sergy



Les nouveaux bâtiments au Point 2 se résument à un bâtiment (SDX) coiffant le puits d’installation du détecteur de l’expérience ALICE et une plate-forme de stockage d’hélium gazeux (SHE).



Figure 4.31 Vue aérienne du Point 2

Tableau 4.17 Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 2

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SDX	25	17	13	425	10	9
SHE	32	16		512		

a. Surface totale des bâtiments (hors SHE) = 425 m²

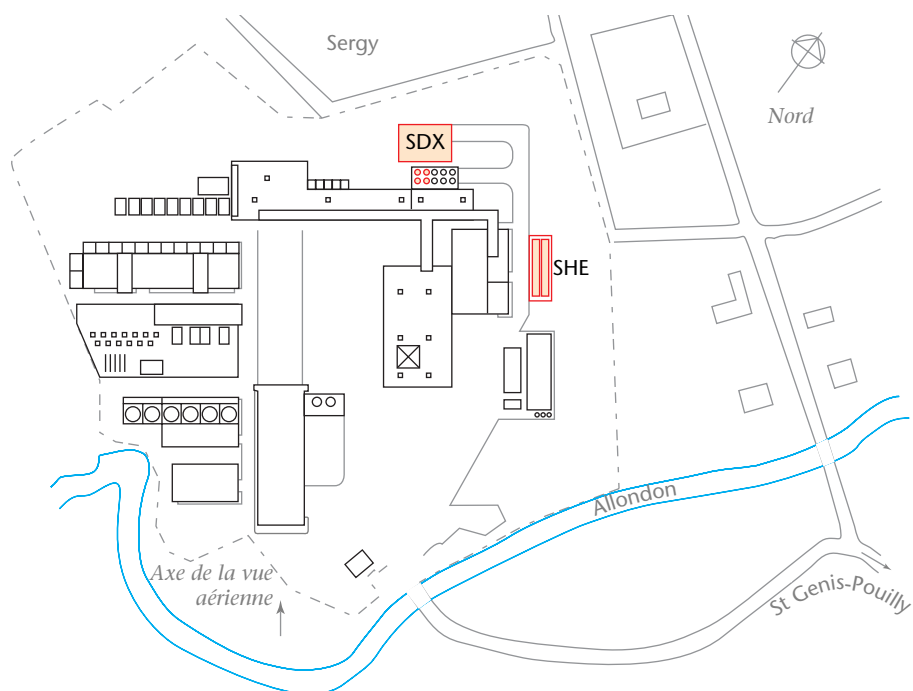


Figure 4.32

Plan de masse des ouvrages de surface au Point 2

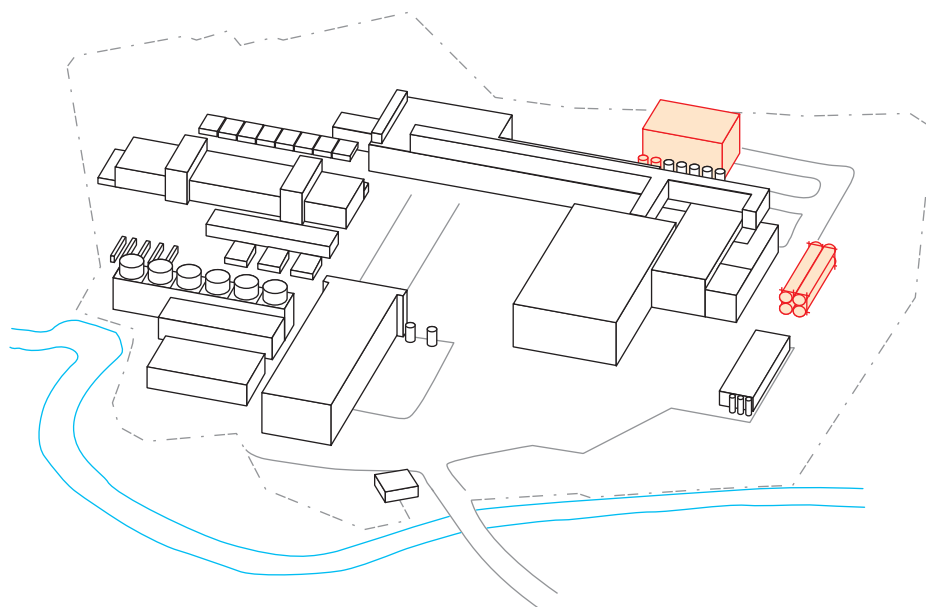


Figure 4.33

Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 2

4.2.5 L'ouvrage de surface au Point 3.2 à Crozet



Il s'agit de réaliser une plate-forme de stockage d'hélium gazeux de 32 m sur 16 m du type SHE comportant 6 réservoirs de stockage d'hélium de 250 m³.



Figure 4.34 Vue aérienne du Point 3.2

Tableau 4.18 Caractéristiques de l'ouvrage de surface au Point 3.2

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m²)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SHE	32	16		512		

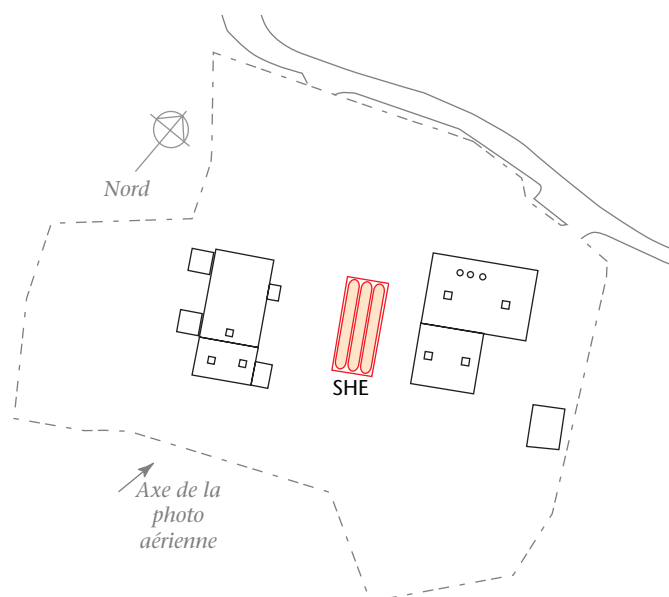


Figure 4.35

Plan de masse de l'ouvrage de surface au Point 3.2

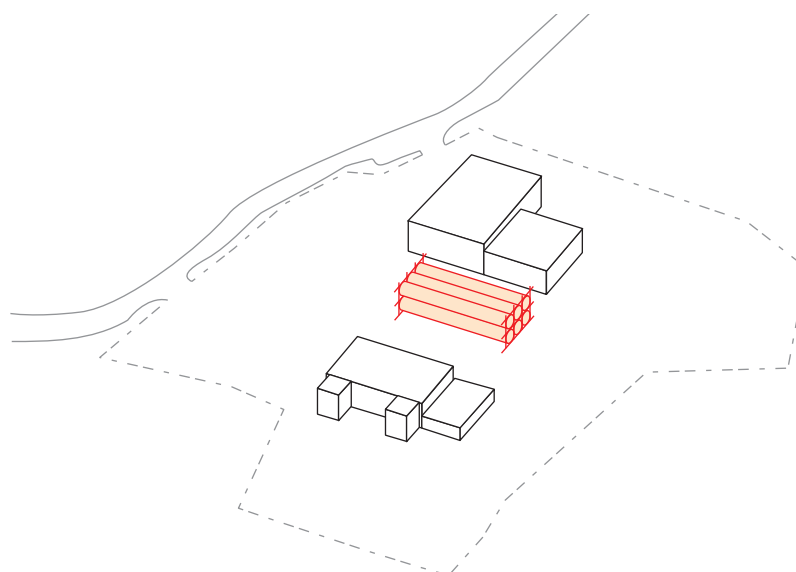


Figure 4.36

Vue axonométrique de l'ouvrage de surface au Point 3.2

4.2.6 L'ouvrage de surface au Point 3.3 à Crozet



Il s'agit de réaliser une sous-station électrique, c'est-à-dire un bâtiment de type SE de 25 x 16 m et d'une hauteur de 9 m. Sa conception est semblable à celle du bâtiment voisin construit à l'occasion du projet LEP avec une architecture intégrée dans le style local



Figure 4.37 Vue aérienne du Point 3.3

Tableau 4.19 Caractéristiques de l'ouvrage de surface au Point 3.3

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SE	25	16	9	400		

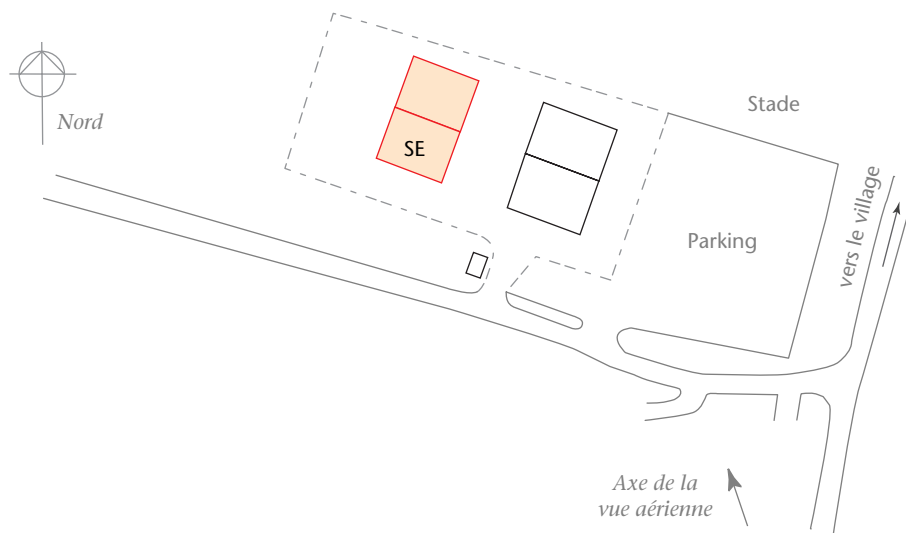


Figure 4.38

Plan de masse de l'ouvrage de surface au Point 3.3

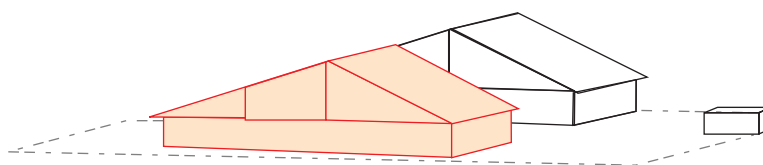


Figure 4.39

Vue axonométrique de l'ouvrage de surface au Point 3.3

4.2.7 Les ouvrages de surface au Point 4 à Echenevex



Au Point 4, les nouveaux bâtiments sont nécessaires pour doubler les installations cryogéniques existantes.



Figure 4.40 Vue aérienne du Point 4

Tableau 4.20 Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 4

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SDH	30	8	13	240	10	10
SHE	32	16		512		
SHM	46	15	10	690	20	6

a. Surface totale des bâtiments (hors SHE) = 930 m²

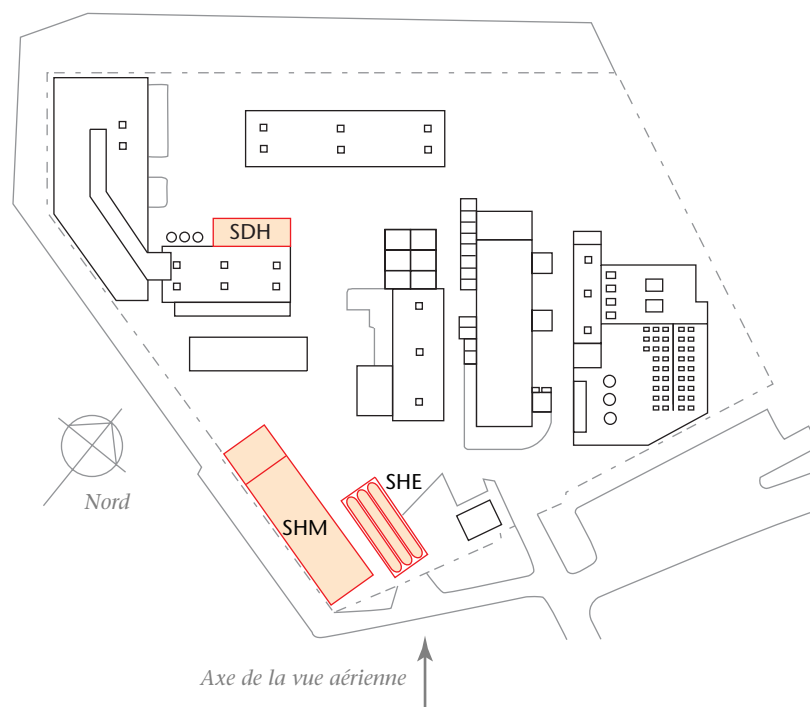


Figure 4.41

Plan de masse des ouvrages de surface au Point 4

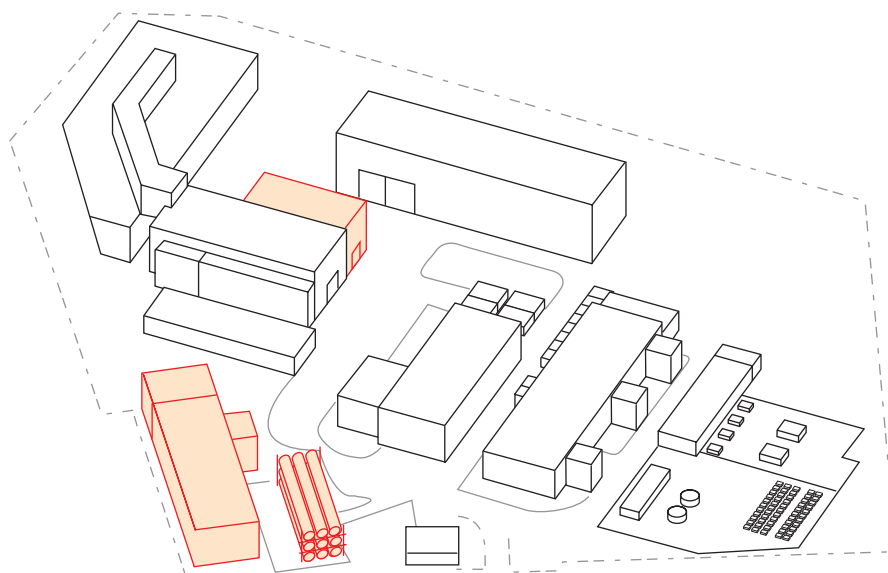
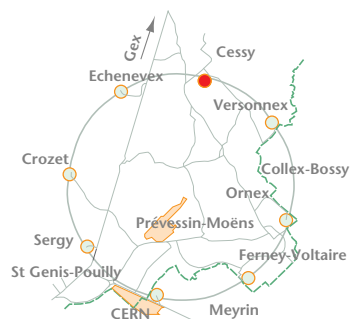


Figure 4.42

Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 4

4.2.8

Les ouvrages de surface au Point 5 à Cessy



L'implantation d'une des deux grandes expériences du LHC au Point 5 nécessite, dans une première phase, la construction d'un bâtiment de montage (SX) de 23 m de hauteur et 141 m de longueur pour le pré-assemblage en surface des modules du détecteur CMS. En phase d'exploitation (phase 2), après l'installation du détecteur en tréfonds, les dimensions de ce bâtiment sont réduites afin d'en diminuer l'impact visuel. Les bâtiments techniques pour la ventilation des halles souterraines et la production de froid représentent l'indispensable complément des imposantes installations en sous-sol.



Figure 4.43

Vue aérienne du Point 5

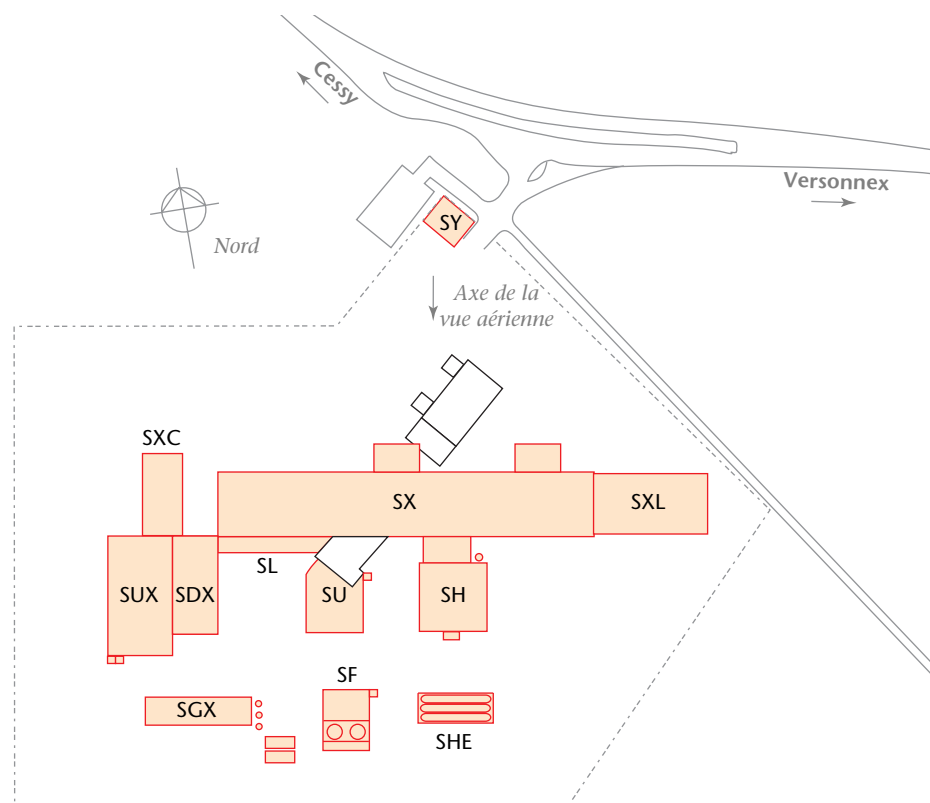


Figure 4.44 Plan de masse des ouvrages de surface au Point 5 : phase 1

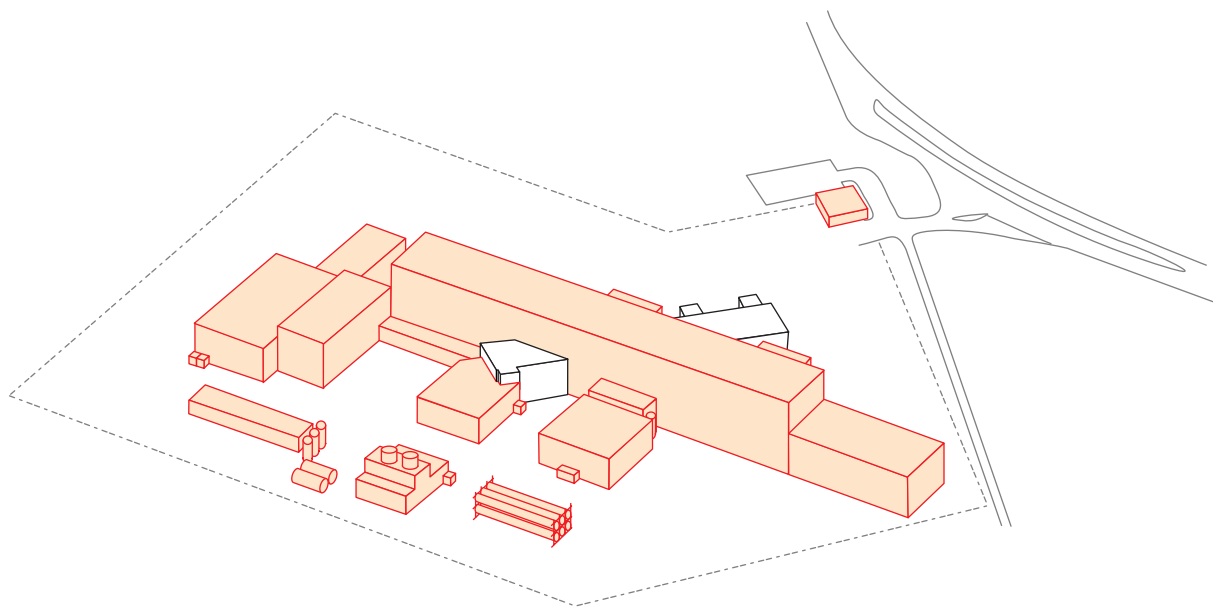


Figure 4.45 Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 5 : phase 1

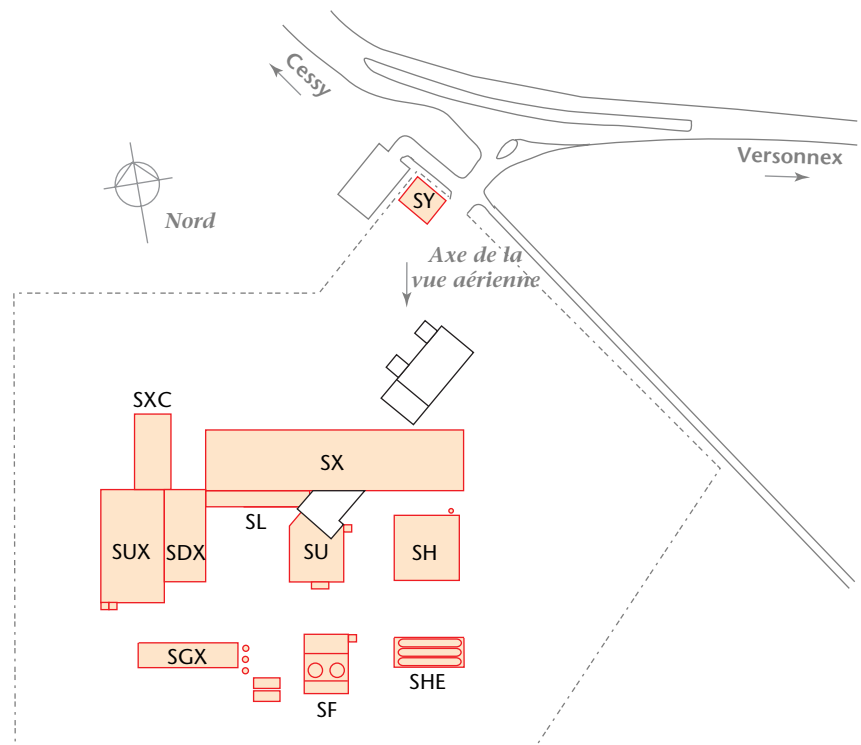


Figure 4.46

Plan de masse des ouvrages de surface au Point 5 : phase 2

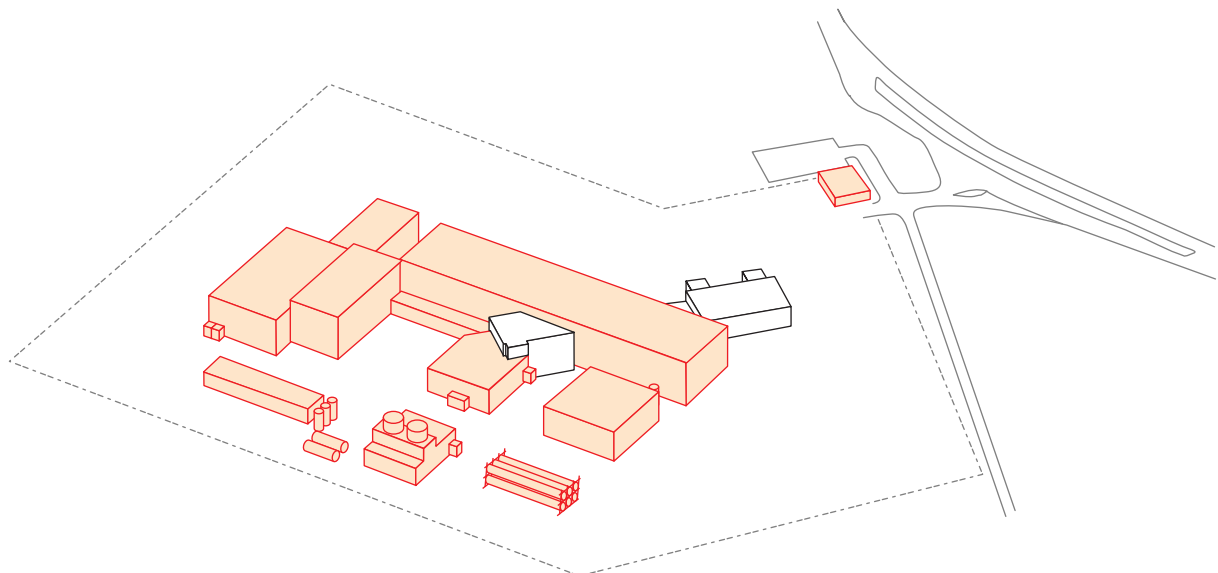


Figure 4.47

Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 5 : phase 2

4 - Ouvrages à réaliser

Tableau 4.21 Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 5

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SDX	36	17	16	612	80	10
SF	23	18	16	414	3,2	7
SGX	40	10	5	400		
SH	25	25	10	625	20	6
SHE	32	16		512		
SU	22	20	9	440		
SUX	44	24	13	1 056	8	6,7
SX	141	22 ^b	23 ^c	3 198	80	18,5
SXC	30	14	11	420		
SXL^d	42	22	14	924	20	10
SY	13	11	4	143		

a. Surface totale des bâtiments (hors SHE) = 8 232 m²

b. Trois petits bâtiments annexes de 8 x 4 m et d'une hauteur de 16 m sont ajoutés de part et d'autre du bâtiment SX.

c. La hauteur de ce bâtiment est réduite à 16 m lorsque l'assemblage du détecteur est terminé et sa longueur ramenée à 102 m.

d. Ce bâtiment est démonté à la fin de la phase d'assemblage du détecteur.

4.2.9 Les ouvrages de surface au Point 6 à Versonnex



Les bâtiments supplémentaires au Point 6 sont essentiellement liés au doublement des capacités cryogéniques.



Figure 4.48 Vue aérienne du Point 6

Tableau 4.22 Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 6

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SDH	20	15	13 ^b	300	10	9
SHE	32	16		512		
SHM	40	15	10	600	20	6

a. Surface totale des bâtiments (hors SHE) = 900 m²
b. Surélévation d’une partie du bâtiment existant de 9,30 m à 13 m

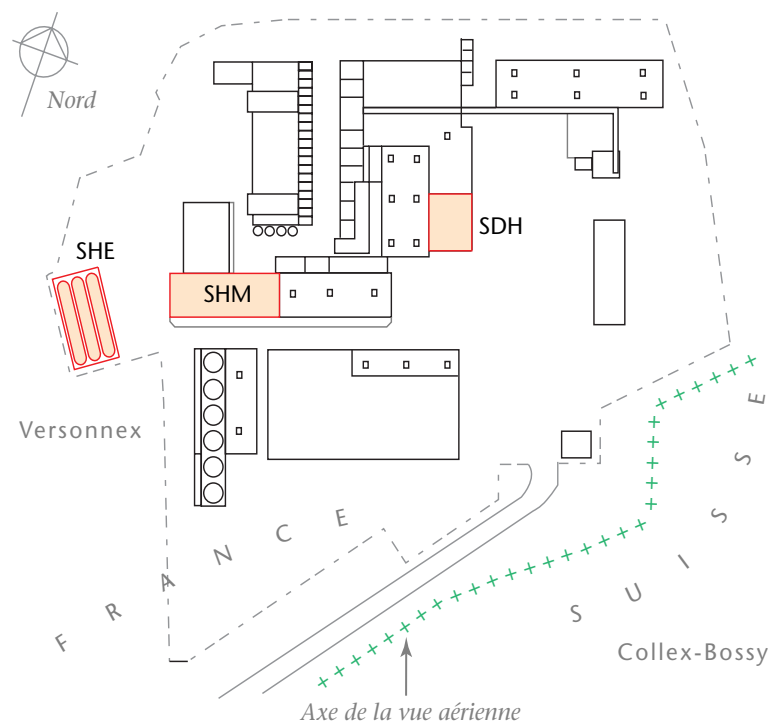


Figure 4.49 Plan de masse des ouvrages de surface au Point 6

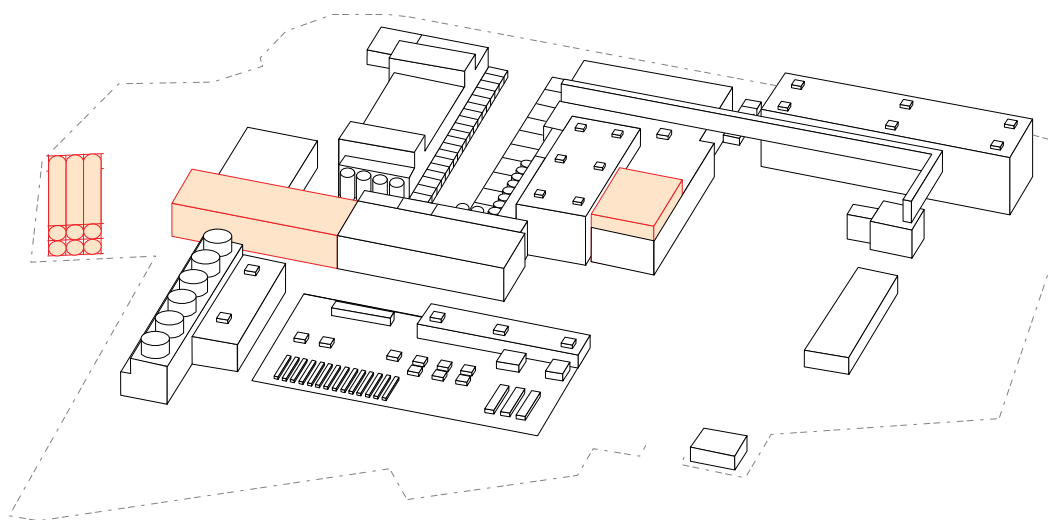


Figure 4.50 Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 6

4.2.10 L'ouvrage de surface au Point 7.1 à Ornex



Il s'agit de réaliser une plate-forme de stockage d'hélium gazeux de 32 x 16 m de type SHE comportant 6 réservoirs de stockage d'hélium de 250 m³.



Figure 4.51 Vue aérienne du Point 7.1 ; au premier plan, le lycée international de Ferney

Tableau 4.23 Caractéristiques de l'ouvrage de surface au Point 7.1

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²)	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SHE	32	16		512		

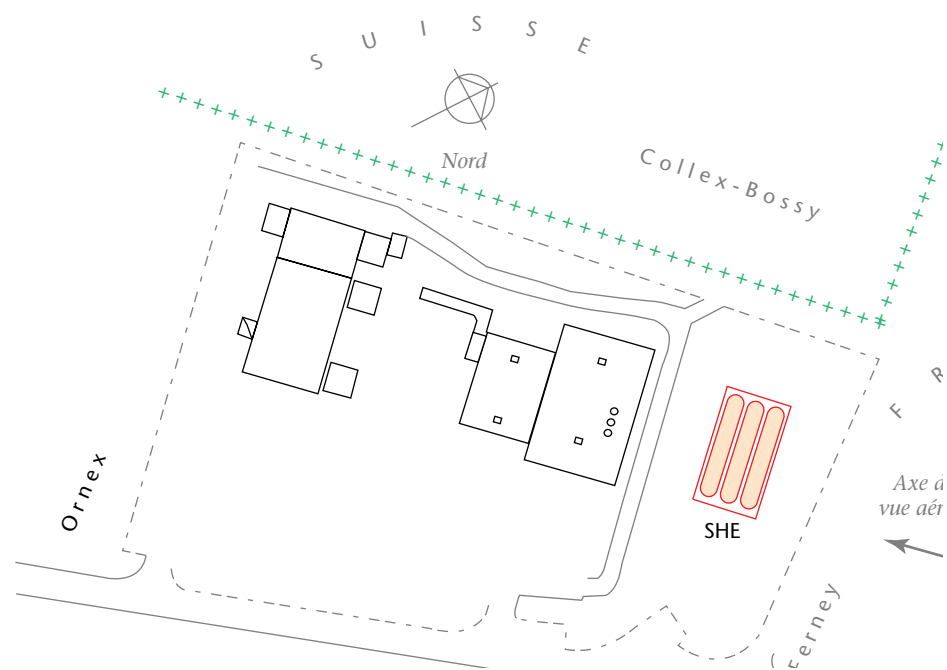


Figure 4.52 Plan de masse des ouvrages de surface au Point 7.1

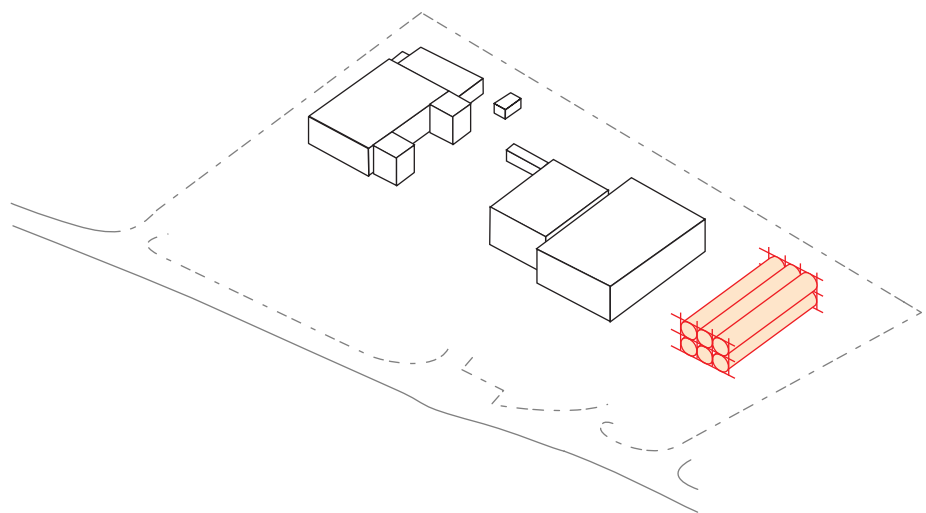
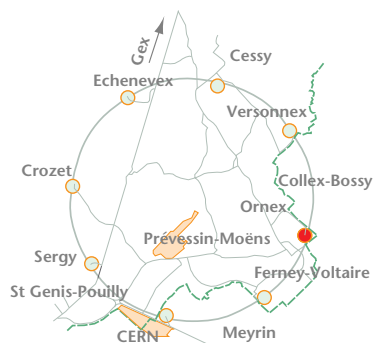


Figure 4.53 Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 7.1

4.2.11

L'ouvrage de surface au Point 7.2 à Collex-Bossy en Suisse



Il est prévu de réaliser les travaux souterrains d'excavation par le tunnel depuis le Point 6. Si toutefois, contre toute probabilité, cela n'était pas possible, il faudrait creuser un puits de 6 m de diamètre qui serait ensuite couvert d'un petit bâtiment de type chalet. Une solution semblable a été adoptée au Point 3 à Crozet lors de la construction du LEP.

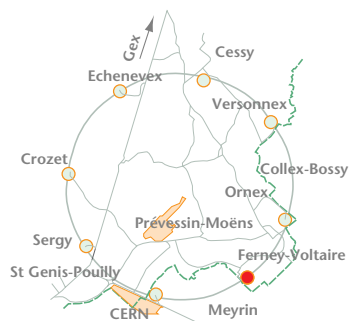


Figure 4.54

Vue aérienne du Point 7.2

4.2.12

Les ouvrages de surface au Point 8 à Ferney-Voltaire



Les nouveaux bâtiments du Point 8 sont essentiellement liés au doublement de la capacité des installations cryogéniques.



Figure 4.55

Vue aérienne du Point 8

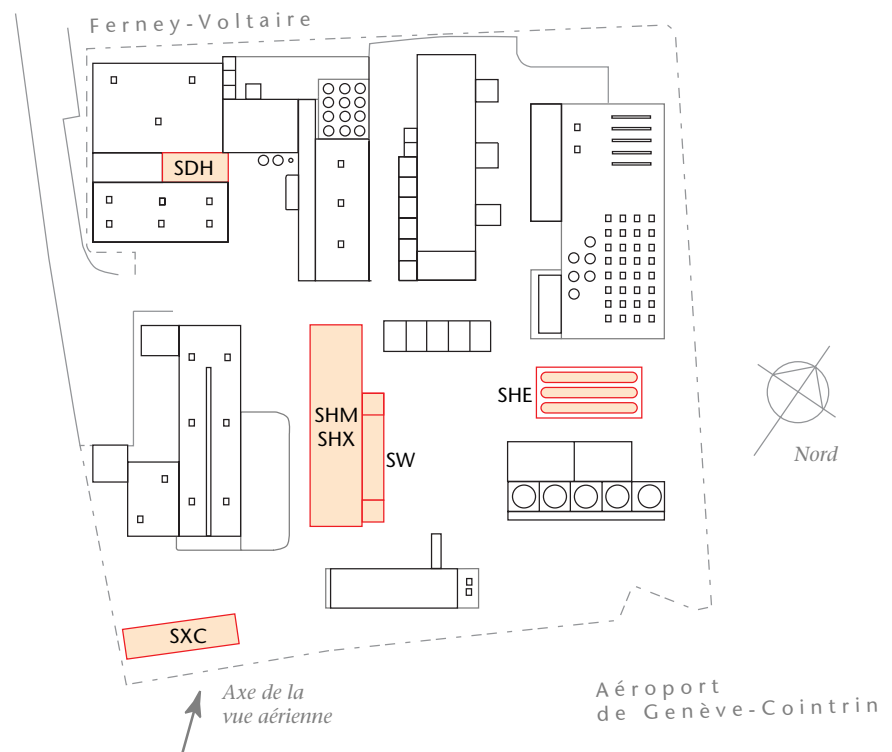


Figure 4.56 Plan de masse des ouvrages de surface au Point 8

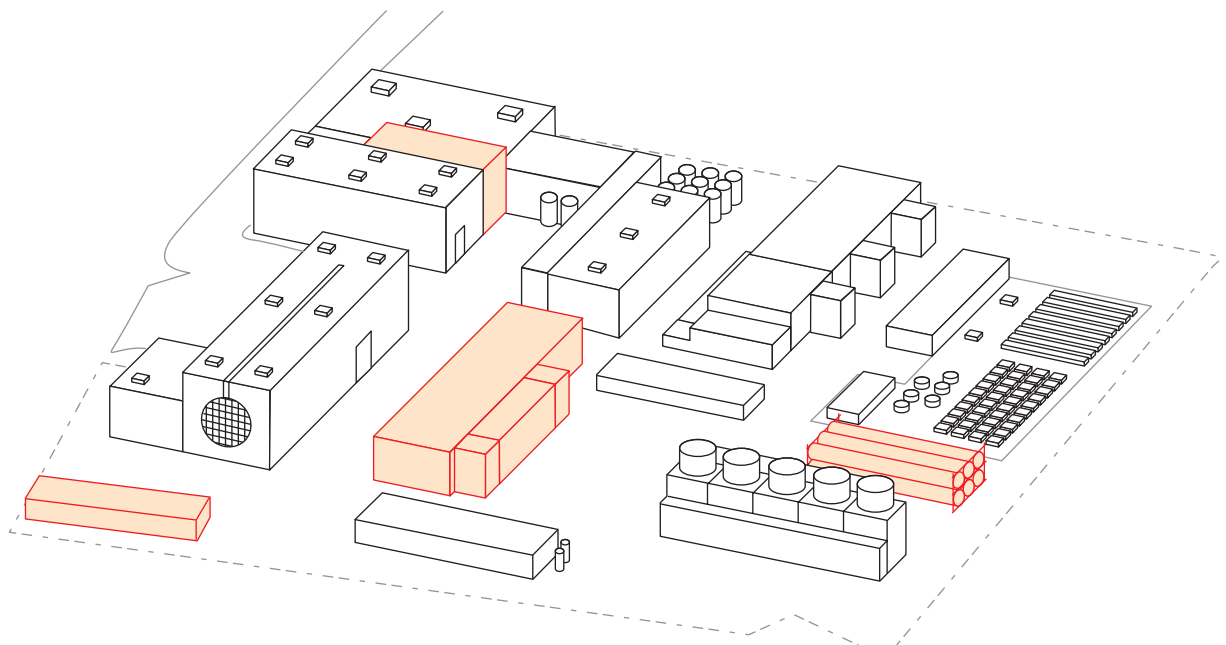


Figure 4.57 Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 8

Tableau 4.24**Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 8**

Ouvrage	Longueur ou diamètre (m)	Largeur ou diamètre (m)	Hauteur (m)	Surface au sol (m ²) ^a	Force du pont (t)	Hauteur crochet (m)
SDH	24	9	13	216	10	9
SHE	32	16		512		
SHM/SHX	58	15	10	870	20	6
SW	33	10	9	198		
SXC	32	9	4	188		

a. Surface totale des bâtiments (hors SHE) = 1 472 m²

4.3

Les nouvelles lignes électriques enterrées

4.3.1

Alimentation électrique du LHC

Les réseaux électriques de haute et de moyenne tensions construits pour le projet LEP étaient eux-mêmes une extension du réseau développé pour l'accélérateur SPS alimenté par une ligne 400 kV en provenance du barrage de Génissiat et spécialement construite pour le SPS.

Pour le LHC, ce réseau est réutilisé dans son intégralité. Il est cependant nécessaire de le renforcer pour alimenter les deux points qui recevront les grands détecteurs ATLAS et CMS, c'est-à-dire les Points 1 et 5. Les Points 2, 4, 6 et 8 sont alimentés depuis le site de Prévessin du CERN par un réseau de lignes 66 kV enterrées. L'extension de ce réseau aux Points 1 et 5 se fait selon la même technique pour préserver l'environnement.

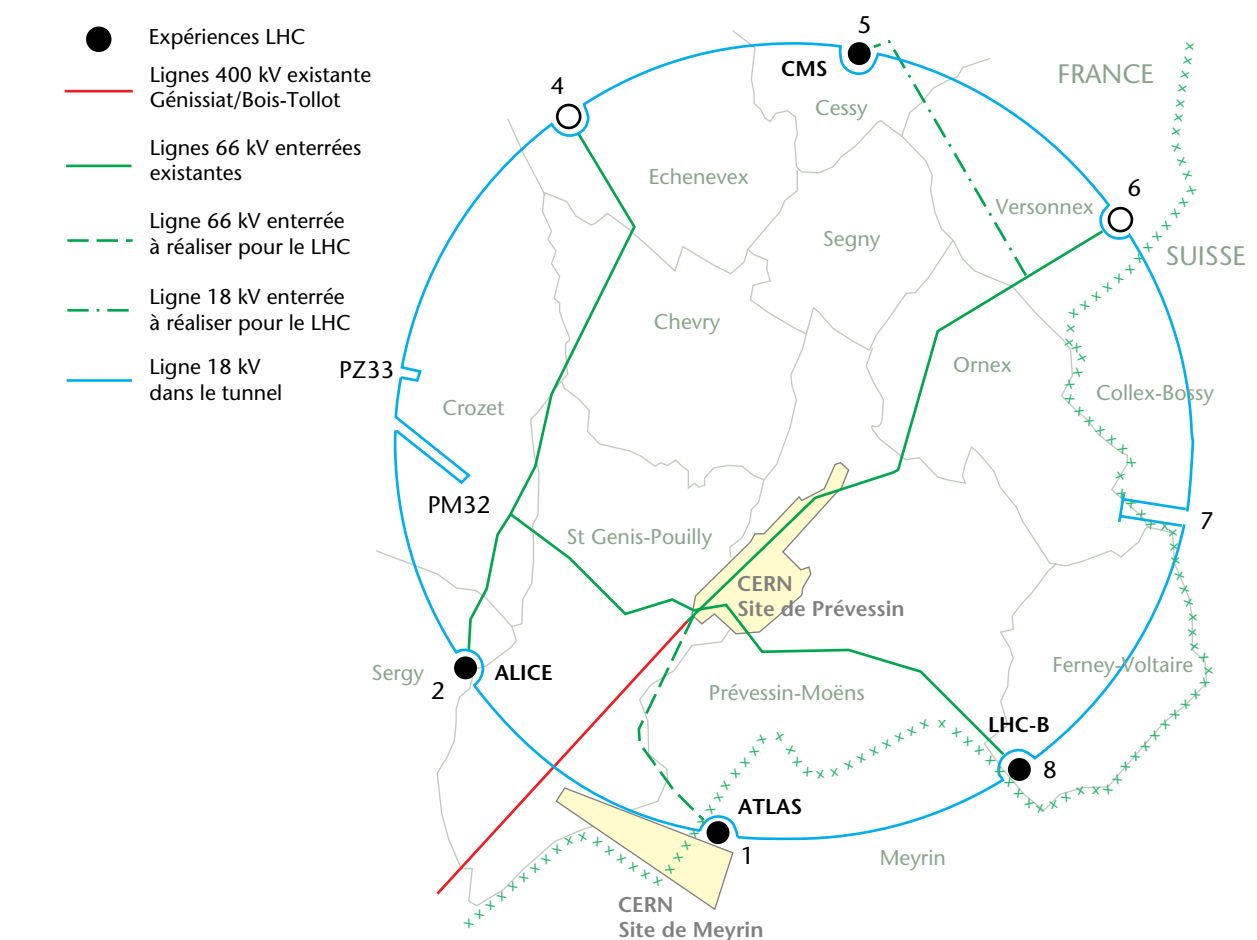


Figure 4.58

Plan schématique des liaisons électriques enterrées LEP/LHC

Il est donc prévu de construire :

- une liaison 66 kV entre la sous-station électrique 400 kV/66 kV du site de Prévessin du CERN et le Point 1 à Meyrin en Suisse (voir figure 4.58).
- une liaison 18 kV reliant le Point 5 à Cessy et le Point 6 à Versonnex (voir figure 4.58).

La ligne 66 kV est enterrée dans une tranchée de 1,30 m de profondeur et de 0,50 m de largeur au fond (voir figure 4.59). Elle est composée de trois câbles en aluminium d'une section de 500 mm² placés à l'intérieur d'une goulotte préfabriquée en béton recouverte d'un couvercle.

La ligne 18 kV est enterrée dans une tranchée de 1,30 m de profondeur et de 0,75 m de largeur au fond. Elle est composée de trois câbles en cuivre d'une section de 400 mm² placés sur un lit de sable. Cette tranchée comprend

également trois fourreaux de 50 mm de diamètre pour le passage de fibres optiques (voir figure 4.59).

Comme ce fut déjà le cas pour les liaisons 66 kV du LEP, les tranchées sont implantées sur le bas-côté de routes existantes.

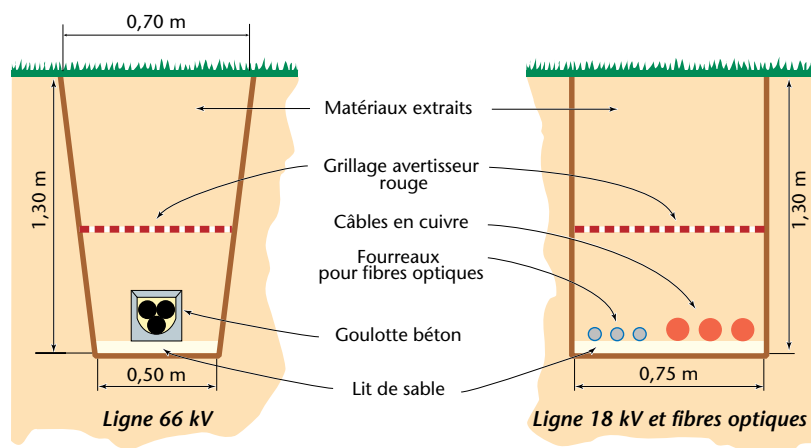


Figure 4.59

Tranchées-types pour fibres optiques et lignes électriques 66 kV et 18 kV

4.3.2

Cheminement des lignes électriques à réaliser

La ligne 66 kV reliant le site de Prévessin du CERN et le Point 1 traverse la RD 35 pour longer l'ancien CD 35 sur le domaine privé du CERN sur 710 m, après avoir traversé le CVO 5 à Saint Genis-Pouilly (rue du Moulin-des-Ponts).

La ligne suit ensuite le chemin des peupliers qui sépare les communes de Saint Genis-Pouilly et Prévessin-Moëns jusqu'au CVO 5 de Prévessin-Moëns (route de l'Europe), qu'elle longe sur 130 m. Puis, elle passe à travers les terrains de l'Etat français mis à la disposition du CERN jusqu'à la frontière franco-suisse. Elle traverse ensuite le chemin douanier suisse, puis les terrains de la Confédération suisse frappés d'un droit de superficie en faveur du CERN. Elle arrive sur le site du Point 1 à Meyrin après avoir traversé le chemin de la Berne.

La traversée du Bois de Serves, ainsi que le passage de la frontière se font sans ouverture de tranchée en utilisant des fourreaux déjà installés.

La ligne 18 kV alimentant le Point 5 à Cessy depuis le Point 6 à Versonnex longe la route d'accès au Point 6, sur le domaine du CERN, jusqu'à l'intersection avec la RD 15b (900 m). Elle suit l'accotement de cette route jusqu'à Versonnex (1 800 m), puis la RD 15g (Cessy) jusqu'au site du Point 5 (1 750 m).

La traversée du centre du village de Versonnex se fait sans ouverture de tranchée en utilisant des fourreaux déjà installés et réservés pour cet usage.

5

La conduite des travaux

5.1

Généralités

Comme c'est le cas de l'actuel collisionneur LEP, la majeure partie des ouvrages du LHC est située en sous-sol. Cette disposition, qui tend bien évidemment à réduire l'impact sur l'environnement des ouvrages définitifs, comporte également des répercussions positives au niveau des chantiers, les plus importants restant en grande partie invisibles.

En ce qui concerne les chantiers de surface, il convient de noter que la plupart d'entre eux se trouvent enclavés dans des zones LEP existantes, ce qui limite d'autant leur impact. L'option choisie, c'est-à-dire des zones de chantier bien délimitées et ne débordant pas, autant que possible, des clôtures actuelles, est le meilleur garant d'effets limités en cours de construction.

S'appuyant sur son expérience passée dans la construction des accélérateurs SPS et LEP, le CERN prend, pour le projet LHC, non seulement les précautions et mesures imposées par la législation en vigueur, mais y intègre également les enseignements tirés de la conduite des projets antérieurs. L'objectif prioritaire du CERN est la réduction significative de l'impact d'un tel projet sur le voisinage et l'environnement.

Le volume des travaux souterrains représente moins de la moitié de ceux du LEP avec, pour l'essentiel, deux chantiers d'importance sensiblement égale, situés

l'un en France à Cessy (Point 5), l'autre en Suisse à Meyrin (Point 1). Les autres chantiers ont un caractère plus modeste et restent à l'intérieur des sites actuels du LEP et du SPS.

5.1.1

Découpage des travaux en lots

Le découpage en lots de l'ensemble des travaux de génie civil du LHC se veut résolument géographique. Trois lots ont ainsi été délimités, couvrant chacun l'ensemble des ouvrages construits tant en souterrain qu'en surface. Il s'agit de :

- la zone du Point 1 (Lot 1) : cavernes expérimentales et de service, puits, galeries diverses, bâtiments et ouvrages de surface ;
- la zone du Point 5 (Lot 2) : cavernes expérimentales et de service, puits, galeries diverses, bâtiments et ouvrages de surface ;
- l'ensemble des autres zones autour de l'anneau (Lot 3) : tunnels de transfert vers les Points 2 et 8 et leurs puits d'accès, ouvrages souterrains d'arrêt des faisceaux autour du Point 6, cavernes et puits des Points 2 et 7, galeries diverses, bâtiments et ouvrages de surface pour tous les points sauf les Points 1 et 5.

Ce découpage concerne non seulement les phases de travaux, mais également toutes les phases de conception, de même que la structure de gestion du CERN.

La réalisation de l'ensemble des prestations jusqu'à leur achèvement est, pour chaque lot, sous la responsabilité d'une équipe du CERN, d'un bureau (ou consortium de bureaux) d'ingénieurs et d'une entreprise (ou consortium d'entreprises) spécifiques.

5.1.2

Coordination de la sécurité

Chaque marché d'études ou de réalisation fait au préalable l'objet d'appels d'offres internationaux. Les conditions et limites des prestations, les spécifications techniques et obligations de tous ordres des contractants sont très clairement définies. En particulier, les entreprises sont tenues de respecter strictement, comme ce fut le cas pour le LEP, l'ensemble des réglementations des Etats-hôtes selon la zone d'implantation des travaux à leur charge.

Dans cet esprit, le CERN a conclu avec une société de contrôle technique un contrat pour l'exécution d'une mission de coordination de la sécurité et de protection de la santé des travailleurs intervenant sur le chantier du LHC, en accord avec la Directive Européenne 92.57 du 24 juin 1992 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé à mettre en œuvre sur les chantiers temporaires ou mobiles ¹.

1. J.O.C.E. du 26 août 1992. Le texte de référence pour la France est le décret n° 94-1159 du 26 décembre 1994 (J.O. du 29 décembre 1994).

Dans le cadre de son contrat, cette société participe à toute la phase conception, étude et élaboration du projet, phase concrétisée par la rédaction d'un Plan Général de Coordination de la Sécurité et de Protection de la Santé des travailleurs, et par la tenue d'un registre-journal.

Pour la phase de travaux, le même type de contrat est conclu. Son titulaire est désigné par voie d'appel d'offres. La société retenue est chargée de veiller, pendant la phase d'exécution, à l'application du Plan Général de Sécurité, après approbation des plans particuliers de sécurité des entreprises. Elle assure également la tenue des documents récapitulant les incidents relatifs à l'hygiène et à la sécurité. De plus, le coordonnateur de sécurité de cette société préside le Collège Inter-entreprises de Sécurité, Santé et Conditions de Travail, et veille particulièrement, pendant le déroulement des différentes phases des travaux, à la bonne application de toutes les mesures d'hygiène et de sécurité en vigueur.

Cette simplicité et cette transparence dans l'organisation de l'ensemble du projet de génie civil sont également de nature à en réduire l'impact sur l'environnement, dans la mesure où les responsabilités sont clairement réparties entre les participants.

5.1.3

Horaires de travail

Sur chaque zone concernée, le travail est exécuté par des équipes travaillant en 3 postes de 8 heures, 5 jours par semaine, avec possibilité de travail exceptionnel le samedi pour des raisons de délais, de sécurité ou de contraintes techniques.

Le transport et la manutention de déblais en surface sont interdits pendant la nuit et un stockage-tampon est prévu (voir figure 5.1). En dehors des horaires réglementaires de travail (06h00 - 20h00)¹, les activités en surface sont réduites et respectent la législation en vigueur en matière de lutte contre le bruit.

Certains bétonnages, en particulier les fûts des puits, doivent se faire en continu. Selon les conditions d'exécution choisies par les entreprises retenues à la suite des appels d'offre en cours (installation ou non de centrales à béton sur les sites notamment), il pourra y avoir une circulation diurne et nocturne de camions-toupies pendant quelques semaines.

1. 05h00 - 20h00 en été pour la Suisse



Figure 5.1

Transport des déblais pour stockage en souterrain pour les ouvrages du LEP

5.1.4

Contraintes géologiques

Les travaux projetés dans le cadre du LHC intéressent les formations quaternaires et la molasse.¹

Mis à part les terrains de couverture récents (terre végétale, remblais, colluvions), les formations quaternaires du Pays de Gex sont essentiellement d'origine glaciaire. Il s'agit surtout de moraines déposées directement par les glaciers, surmontées de formations fluvio-glaciaires issues du remaniement des moraines par les torrents formés par la fonte des glaciers.

Souvent présentes sous la couverture végétale, il s'agit de formations variées, allant des graviers aux argiles, avec les termes de granulométrie intermédiaire (sables, limons, limons argileux).

Les éléments grossiers (graviers sableux, plus ou moins limoneux) sont de loin les plus représentés. Ils ont parfois été remaniés récemment par les cours d'eau et sont considérés alors comme des alluvions. Ils sont généralement compacts, riches en blocs alpins ou jurassiens et de perméabilité très variable selon la teneur en limon.

Les éléments les plus fins (limons, limons argileux, argiles) sont beaucoup moins fréquents dans le secteur du LHC. On les trouve notamment près de Saint Genis-Pouilly (Point 2), de Ferney-Voltaire et Ornex (Point 7). Ces terrains

1. L'état géologique initial pour le projet LHC est présenté au chapitre 6.

sont généralement stratifiés, dépourvus de cailloux, saturés, de qualité médiocre. Leur exploitation ne pose pas de problème en soi, mais les excavations qui les traversent, comme les puits, doivent être réalisées à l'abri d'une enceinte étanche (palplanches, paroi moulée, etc.).

Les moraines se présentent également sous des faciès variés selon la proportion d'éléments fins qu'elles renferment : d'où les dénominations de moraine graveleuse, sableuse, limoneuse, limono-argileuse ou argileuse. Cette fraction fine influence considérablement la perméabilité : les moraines graveleuses sont généralement perméables, les moraines limoneuses ou argileuses sont pratiquement imperméables. Elles ont en commun la présence de blocs d'origine alpine ou jurassienne, de toutes dimensions.

Dans la plupart des cas, les moraines ont été fortement consolidées par le poids des glaciers qui leur a conféré une dureté et une compacité élevées.

D'un point de vue constructif, les moraines posent peu de problèmes de fondation ou de stabilité. En revanche, elles présentent souvent des difficultés d'exploitation liées à la présence de blocs ou à leur dureté.

De plus, la moraine graveleuse ("cailloutis morainiques profonds"), outre qu'elle est souvent aquifère, comporte des zones cimentées formant un véritable béton naturel et qui constituent une gêne pour la réalisation des enceintes comme les parois moulées.

Du point de vue des possibilités de réutilisation, les moraines contiennent généralement trop de fines pour être employées comme matériau de remblai à l'exception de la moraine graveleuse qui constitue, avec les graviers fluvio-glaciaires, la principale source de "tout-venant" du bassin genevois.

La molasse du bassin genevois est une roche que les travaux antérieurs du CERN ont permis de bien connaître. Elle est composée d'alternances irrégulières de grès et de marnes avec les termes intermédiaires regroupés sous le nom de marnes gréseuses.

Il s'agit d'une roche tendre, dont la résistance à l'écrasement se situe généralement entre 3 et 30 MPa¹. Pour les ouvrages souterrains, elle offre l'avantage d'être pratiquement étanche, peu fracturée et peu abrasive malgré sa teneur élevée en quartz. Elle présente cependant des inconvénients liés à la faible résistance et à l'altérabilité des marnes, source d'instabilités locales ou de gonflements, et parfois à la présence, surtout dans les grès, d'hydrocarbures liquides (pétrole brut) ou gazeux (méthane). Ces inconvénients impliquent de poser le soutènement rapidement et de prendre des mesures de détection et de ventilation.

L'excavation de la molasse se fait dans la mesure du possible avec des moyens mécaniques puissants (haveuse, tunnelier) qui offrent l'avantage de ne pas

1. MPa : mégapascal (unité de pression)

détériorer la roche en parement. Dans les puits dont le petit diamètre ne permet pas la mise en œuvre d'engins adéquats, le recours à l'explosif est nécessaire, avec un plan de tir approprié (voir paragraphe 5.1.5.3, page 143).

La molasse s'altérant rapidement à l'air et en présence d'eau, il est difficile de l'utiliser comme matériau de remblai sauf en prenant des précautions particulières. Elle est généralement mise en dépôt.

5.1.5

Techniques de réalisation

Les techniques ayant fait leur preuve pour le LEP sont utilisées.

5.1.5.1

Congélation du sol

La traversée des moraines aquifères, avec ou sans circulation d'eau, pose un problème technique d'importance lors du creusement d'un puits par exemple.

Le principe de la congélation est simple : il consiste à geler un terrain meuble contenant de l'eau, d'une part pour lui conférer une résistance élevée et par conséquent un comportement comparable à celui d'une roche, d'autre part pour obtenir une étanchéité totale qui exclut toute venue d'eau pendant l'excavation (figure 5.2). La congélation est un soutènement provisoire ; il s'agit donc uniquement d'un moyen d'exécution, souvent le seul moyen pour réaliser des ouvrages dans des terrains extrêmement difficiles. Cette technique assure une protection efficace des nappes phréatiques rencontrées ; elle en évite la pollution sans interférer sur le régime d'écoulement souterrain de l'eau.

Le terrain est refroidi à l'aide de tubes congélateurs concentriques enfoncés dans le sol, dans lesquels circule un liquide réfrigérant. Ils sont mis en place dans des trous forés au préalable. La distance entre les tubes est généralement comprise entre 0,5 m et 1,2 m. Les tubes congélateurs sont munis de vannes pour régler la circulation de liquide réfrigérant et sont reliés aux conduites de distribution suffisamment isolées. Le froid est produit par une centrale frigorifique fonctionnant à l'ammoniac.

Le liquide réfrigérant est la saumure. Sa température varie entre -15°C et -30°C . Au cours de la circulation du liquide, il se forme autour de chaque tube congélateur une gaine cylindrique de terrain gelé dont le diamètre augmente avec le temps jusqu'à ce que la soudure des cylindres de glace se réalise. On se trouve alors en présence d'un anneau de glace continue et étanche. Après avoir laissé croître son épaisseur jusqu'à la valeur fixée par les conditions de résistance désirées, il suffit d'entretenir la congélation du sol pour exécuter les travaux à l'abri de cette enceinte.

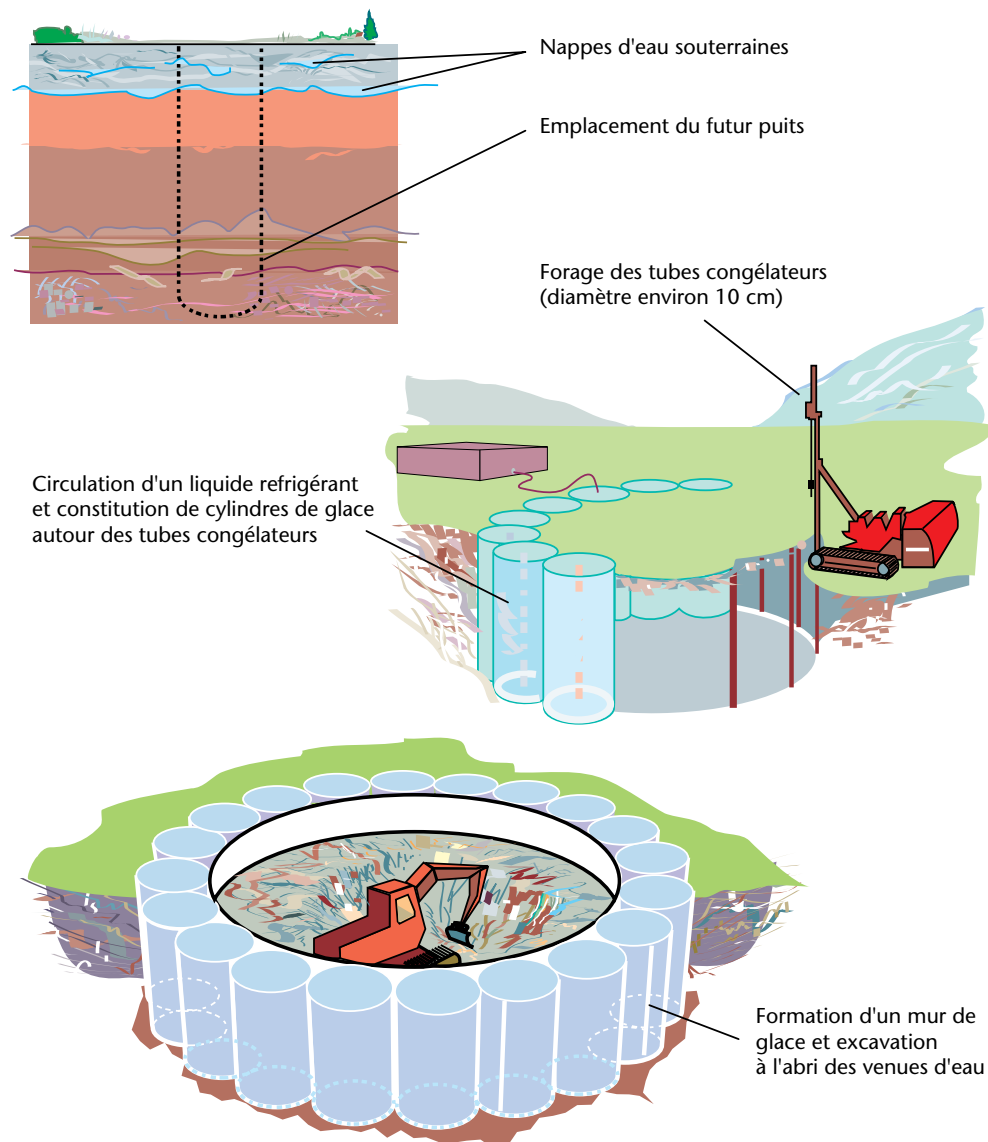


Figure 5.2

Principe de l'excavation avec congélation du sol

Comme pour toute installation en surface, le CERN veille à ce que la centrale frigorifique soit bien isolée conformément aux normes et prescriptions d'emploi en vigueur, tant au niveau sonore que contre les fuites éventuelles des machines, compresseurs ou tuyauteries. Enfin, un soin particulier est apporté à la récupération et au recyclage du fluide réfrigérant.

Un organisme agréé assiste le CERN pour les opérations d'approbation, visites et contrôles de sécurité qui s'imposent sur ce type d'équipement.

La congélation est stoppée dès que l'avancement des travaux est affranchi des problèmes posés par la présence d'eau.

5.1.5.2

Paroi moulée

Il s'agit de la construction d'une enceinte étanche à l'eau par implantation de panneaux jointifs étanches ancrés dans la roche située sous le terrain morainique. Exécutée au préalable dans le terrain en place, elle isole là aussi le puits du terrain environnant avant tout début de creusement.

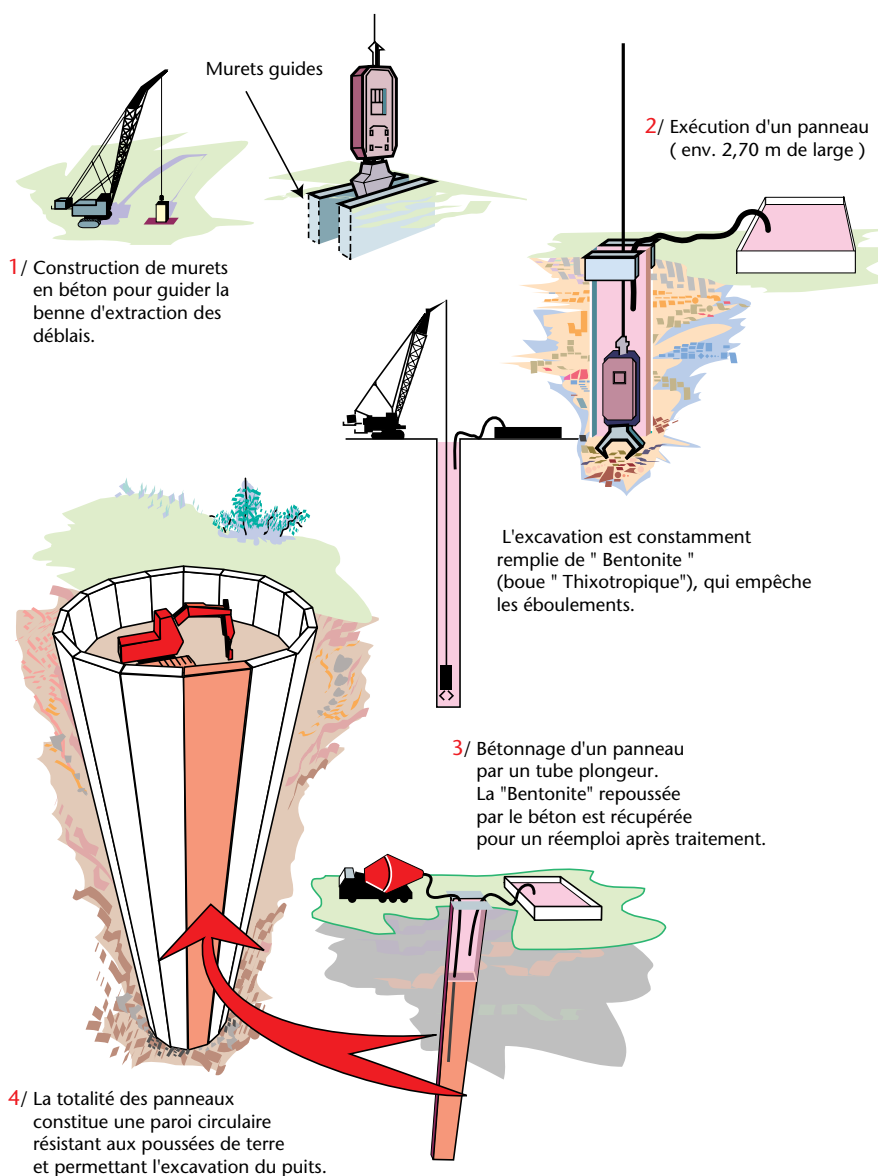


Figure 5.3

Exécution d'un puits par la méthode de la paroi moulée

5.1.5.3

Emploi des explosifs

L'emploi des explosifs est strictement réglementé aussi bien en Suisse ¹ qu'en France ².

D'une manière générale, ces réglementations concernent le commerce, le permis d'acquisition et d'emploi, ainsi que les prescriptions générales de sécurité (entreposage, transport et utilisation). Outre ces réglementations, le CERN prescrit les recommandations de l'Association Française des Travaux Souterrains (AFTES) comme ligne de conduite aux entreprises exécutant les travaux, en particulier pour les méthodes et les horaires de tir, et se fait assister par un laboratoire spécialisé ayant acquis une grande expérience dans ce domaine.

Comme pour les travaux du LEP exécutés dans la plaine, le CERN limite au strict minimum l'emploi d'explosifs pour les travaux du LHC. Cette restriction se fonde principalement sur les deux raisons suivantes :

- la volonté de limiter les nuisances éventuellement causées en surface par les vibrations et bruits dûs aux explosions,
- la nécessité d'éviter autant que possible les ébranlements et, par voie de conséquence, la fissuration de la roche autour des ouvrages. En effet, contrairement aux ouvrages souterrains classiques (tunnels ferroviaires, routiers, etc.), l'assise des ouvrages du CERN doit être stable au millimètre près afin de garantir la précision de l'installation des éléments de la machine.

Exclure totalement les explosifs est impossible car certains travaux ne peuvent être exécutés autrement. Les deux effets susmentionnés sont grandement fonction de la profondeur à laquelle les tirs sont effectués. Les ouvrages concernés sont les puits de petit diamètre et, partiellement, les halles souterraines, ou bien des tronçons de galeries de faible section.

Les puits sont creusés dans la molasse à des endroits où celle-ci est recouverte d'une épaisseur de moraine variant entre 8 et 50 m. S'ils ont lieu, les tirs de mines commencent donc à des profondeurs qui réduisent leurs nuisances. Les tirs de nuit sont interdits, sauf cas de force majeure liés à la sécurité du chantier.

Par ailleurs, l'utilisation de mini-charges à déclenchement séquentiel, qui a fait ses preuves sur les chantiers du LEP, est prescrite aux entreprises. Cette méthode consiste à déposer des mini-charges dans des forages exécutés suivant une spirale qui commence au centre du puits à excaver. Les mini-charges sont ensuite mises à feu l'une après l'autre en commençant par celle du centre, par un système de micro-retards de quelques dizaines de millisecondes.

L'excavation est ainsi réalisée par abattage vers le centre déjà broyé, ce qui réduit considérablement les ébranlements. Cette méthode a été utilisée avec

1. Loi Fédérale sur les substances explosives du 25 mars 1977, Ordonnance sur les explosifs du 26 mars 1980, chapitre VIII du Règlement des Chantiers - Police des Constructions de la République et Canton de Genève.

2. Décret n° 87-231 du 27 mars 1987 introduisant l'application de la nouvelle réglementation.

succès pour le creusement d'un tunnel routier long de 535 m, sous le plateau de la Duchère à Lyon, sous des bâtiments de 15 étages et sous le Lycée de la Martinière, à une profondeur de 30 m¹.

Des contrôles des effets des vibrations en surface sont systématiquement effectués par un laboratoire extérieur spécialisé. Les plans de tir à établir par les entreprises sont soumis à ce laboratoire pour approbation.

Les halles souterraines sont excavées par des moyens mécaniques (haveuse). Par dérogation, les explosifs sont éventuellement utilisés mais uniquement après essais satisfaisants et en abattage seulement, ce qui réduit considérablement les ébranlements par rapport à des tirs en pleine masse. Ce mode d'exécution a déjà été employé à proximité immédiate d'ouvrages contenant des accélérateurs très sensibles aux vibrations, et qui sont restés en service pendant les tirs sans créer de problèmes.

En résumé, le maximum est fait pour éviter les inconvénients des tirs. Cela implique également que, sous le contrôle du laboratoire-conseil déjà mentionné, des tirs d'essais sont ordonnés afin de fixer les limites de charges en toute connaissance de cause. Le CERN fait en outre bénéficier les entrepreneurs qui doivent effectuer des tirs de mines de l'expérience acquise au cours des travaux du LEP.

Enfin, si nécessaire, le CERN fait procéder, sur les indications d'un laboratoire-conseil spécialisé et en accord avec les propriétaires, à des constats préalables sur les constructions existantes les plus proches des sites concernés. Toutes ces précautions, déjà appliquées lors de la construction du LEP, ont fait leurs preuves, notamment pour le creusement du tunnel dans le calcaire sous le village de Crozet.

5.1.5.4

Autres méthodes d'exécution

Les procédés évoqués tout au long du chapitre sur les travaux en sous-sol sont ceux d'usage le plus courant ; ils apportent un bon compromis entre les différentes contraintes économiques, de délais et de sécurité que l'on rencontre dans ce genre de travaux.

Les concepteurs et les entreprises exécutantes peuvent proposer des variantes à ces méthodes. Dans tous les cas, l'objectif du CERN est de maintenir les engagements pris quant à l'impact du projet sur le voisinage et sur l'environnement, et de veiller à l'application stricte des normes et conditions d'emploi de ces éventuelles variantes d'exécution.

1. voir Revue *Travaux* n° 720, Mai 1996.

5.2 Travaux souterrains

5.2.1 Les puits d'accès

5.2.1.1 Catégories

Il faut distinguer deux catégories de puits :

- Les puits de grande section conduisant aux nouvelles zones expérimentales, par lesquels s'effectue la descente des modules des détecteurs des expériences ATLAS et CMS préassemblés en surface, ainsi que le puits permettant la mise en place des aimants de l'accélérateur.
- Les puits de section plus modeste, qui servent à l'accès du personnel, au transfert de certains équipements nécessaires au fonctionnement de l'accélérateur LHC et des expériences, ainsi qu'à la réalisation de certains ouvrages de génie civil.

5.2.1.2 Techniques de réalisation

Comme pour le LEP, les phases critiques de la réalisation des puits sont la traversée des couches quaternaires de surface (moraines), dont certaines sont aquifères. C'est le cas au Point 5. Les techniques ayant fait leurs preuves pour le LEP sont appliquées avec la mise en œuvre soit d'une enceinte congelée, soit d'une paroi moulée. Enfin, pour les puits où aucune présence d'eau n'a été signalée par les sondages systématiques, un creusement en fouille ouverte blindée est employé.

L'autre phase critique pour ces puits est leur excavation dans la molasse. Celle-ci est exécutée à l'aide de machines haveuses à tête mobile lorsque les dimensions de l'ouvrage le permettent, ou à l'explosif, qui reste la méthode la plus efficace, pour les puits de plus petit diamètre. Contrairement aux idées reçues, l'explosif est la méthode qui cause le moins de nuisances sonores, notamment par rapport aux marteaux-piqueurs ou aux brise-roches. Ces derniers pourraient cependant être utilisés de manière très ponctuelle si nécessaire.

Pour le LHC, l'excavation des puits de grande section est conduite, dans la mesure du possible, non pas en plein air mais à l'abri d'un bâtiment, construit dans une phase préliminaire des travaux. Malgré les contraintes supplémentaires qu'il impose dans la conduite des travaux, ce bâtiment offre l'avantage de protéger le voisinage et l'environnement. Il réduit les bruits engendrés par le chantier et sert par la suite à recevoir les équipements et installations techniques nécessaires au montage, puis au fonctionnement des expériences.

Dans tous les cas, la paroi du puits est maintenue en place et protégée à l'aide d'un soutènement provisoire (ancrages, treillis métallique, béton projeté). La phase finale de réalisation consiste en la mise en place d'une étanchéité et d'un fût en béton coulé en continu constituant ainsi l'ouvrage fini.

5.2.2

Halles et chambres souterraines diverses

5.2.2.1

Catégories

Comme pour les puits décrits ci-dessus, ces ouvrages en sous-sol peuvent se classer en deux catégories :

- les halles d'expériences ATLAS et CMS de grandes dimensions. Situées à une centaine de mètres sous la surface, elles sont directement accessibles par des puits de grande section.
- les diverses chambres de dimensions plus modestes. Elles complètent la configuration des zones expérimentales, assurent les jonctions avec les ouvrages existants du LEP ou encore sont utilisées pour l'implantation d'équipements spéciaux nouveaux dans le tunnel lui-même.

5.2.2.2

Techniques de réalisation

Situées dans la molasse, les halles sont réalisées à l'aide des mêmes types de machines à attaque ponctuelle que celles employées dans le creusement des puits de grande section ; une continuité des méthodes et moyens mis en œuvre est ainsi assurée. La présence d'un hall en surface à la tête des puits est une garantie supplémentaire de protection de l'environnement et du voisinage.

Pour les chambres, il est généralement fait emploi de moyens mécaniques adaptés à leurs dimensions (voir figure 5.4).

L'emploi occasionnel d'explosifs est le fait d'impératifs techniques. Toutes les précautions imposées par la réglementation en vigueur sont appliquées et, à défaut, les recommandations de l'AFTES (Association Française des Travaux Souterrains) servent de ligne de conduite pour ces travaux. Cela est aussi valable pour la mise en œuvre du béton et son approvisionnement.

Au fur et à mesure de l'avancement des excavations, la protection du poste de travail et la consolidation des parois à l'aide d'ancrages, treillis métallique, béton projeté ou toute autre technique appropriée, sont assurées. Enfin, le revêtement final se fait selon les méthodes classiques, à l'aide de coffrages amenés sur place depuis la surface. Les mêmes précautions restent en vigueur pour l'exécution des revêtements et l'approvisionnement en béton sur place, même si ce type d'interventions engendre peu de nuisances.



Figure 5.4

Excavation de l'une des chambres souterraines du LEP

5.2.3

Galeries souterraines

Les galeries de liaison entre divers ouvrages souterrains (à construire ou existants) sont toutes situées dans la molasse. Elles sont creusées à l'aide des mêmes types de machines à attaque ponctuelle que les halles ou les chambres (voir figure 5.5), ou bien, lorsque la section ou la géométrie ne s'y prête pas, à l'aide d'autres moyens mécaniques, éventuellement combinés avec des explosifs.



Figure 5.5

Haveuse en action pendant l'excavation du tunnel du LEP

Là encore, les contraintes et mesures de protection décrites précédemment sont appliquées. Les séquences d'exécution et les méthodes de réalisation de ces ouvrages sont identiques à celles des autres chantiers.

5.2.4

Tunnels de transfert et tunnels vers les absorbeurs de faisceaux

Ces ouvrages qui peuvent être exécutés par les moyens d'excavation mécaniques déjà cités, sont eux aussi implantés entièrement dans la molasse. Toutefois, compte tenu de leur localisation, ainsi que de leurs caractéristiques propres, d'autres méthodes de réalisation sont possibles. Elles sont décrites ci-après.

5.2.4.1

Tunnels de transfert TI 2 et TI 8

Les tunnels de transfert TI 2 et TI 8 sont destinés à relier entre eux les accélérateurs SPS et LHC qui ne sont accessibles que lorsqu'ils sont à l'arrêt. Il est prévu toutefois d'anticiper la construction de ces tunnels jusqu'aux limites imposées par les impératifs de sécurité et de stabilité vis-à-vis des ouvrages existants. Les travaux de raccordement final des tunnels sont réalisés après l'arrêt définitif de l'accélérateur LEP et pendant un arrêt limité de l'accélérateur SPS.

Un puits de génie civil destiné à la conduite des travaux est donc nécessaire à l'aplomb de chaque tunnel. Le puits du tunnel TI 8 ne sert qu'aux besoins du chantier et ses dimensions sont adaptées aux critères d'utilisation, de faisabilité, et de maîtrise des coûts. Il ne reçoit pas de revêtement définitif et est obturé ensuite en surface par une dalle en béton ou un couvercle métallique de

manière à en garantir la sécurité et l'intégration dans son environnement immédiat. Pour le tunnel TI 2, le puits de génie civil de forme ovoïde reçoit un revêtement définitif en béton afin de permettre le transfert des aimants dipolaires de l'accélérateur LHC.

Etant donné les longueurs respectives des tunnels TI 2 et TI 8, l'emploi, soit de machines haveuses à tête mobile (voir figure 5.5), soit de machines à forer à pleine section (tunneliers) similaires à celles utilisées lors de la construction du LEP (voir figure 5.6) est envisageable. Le choix est laissé à l'entreprise chargée de l'exécution des travaux. Dans tous les cas, ce mode d'excavation mécanique n'entraîne aucun ébranlement des terrains et ouvrages avoisinants, et il est donc possible d'approcher au plus près les tunnels existants.



Figure 5.6

Tête d'un tunnelier prête pour l'excavation

Les tunnels font l'objet, au fur et à mesure de leur excavation, d'un soutènement provisoire qui associe des boulons, dont le rôle est d'armer le massif rocheux et de solidariser les blocs disjoints, à du béton projeté armé avec un treillis soudé. Ce procédé est souvent dénommé "nouvelle méthode autrichienne". La phase de soutènement provisoire est suivie de la réalisation de la voûte intérieure coulée en place avec interposition, si nécessaire, d'une étanchéité. Dans le cas d'un creusement au moyen d'une machine à forer à pleine section, le soutènement peut être assuré au moyen de voussoirs en béton préfabriqués posés dès que possible en arrière de la machine (voir figure 5.7).

Quant aux puits de génie civil (PMI 2 et PGC 8) qui servent de fenêtres d'attaque aux tunnels de transfert, ils sont situés pour la partie supérieure dans des moraines relativement étanches. Celles-ci rendent réalisable une excavation à l'abri d'un revêtement de béton (dit "paroi marocaine") coulé en descendant par passes successives de 1,50 à 3 m. Une fois atteint le niveau de la molasse, la méthode de soutènement provisoire utilisée est la Nouvelle méthode autrichienne décrite ci-dessus.

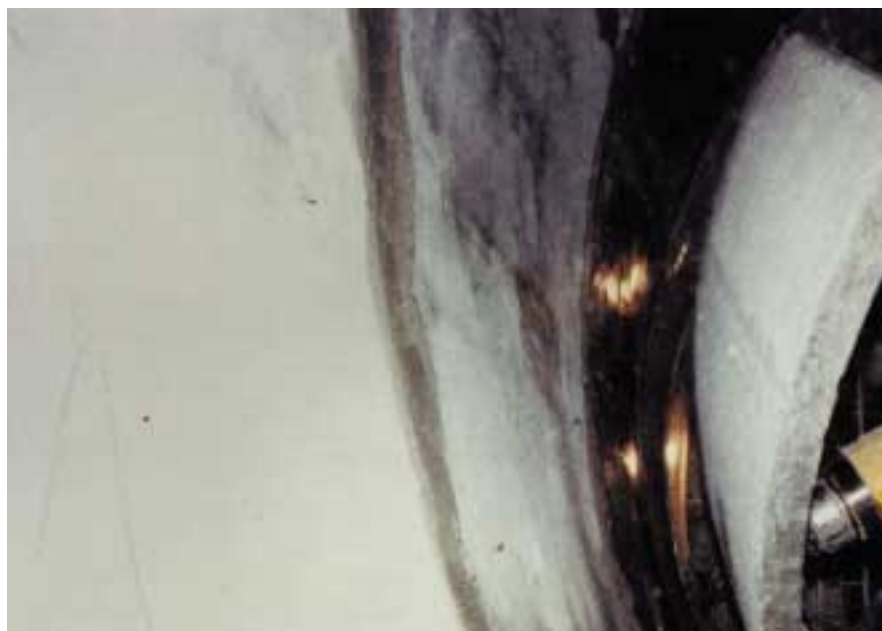


Figure 5.7

Pose de voussoirs derrière le tunnelier pour le tunnel du LEP

Les précautions à l'avancement sont celles appliquées à ce type d'exécution (protection de la roche, détection éventuelle du méthane, ventilation, matériels et engins adaptés pour l'évacuation des déblais).

Durant la phase finale des travaux, les tunnels sont recouverts d'un revêtement en béton selon les moyens classiques.

5.2.4.2

Tunnels vers les absorbeurs de faisceaux

Implantés au Point 6 du LEP, les tunnels et les absorbeurs de faisceaux ne sont accessibles que par le puits d'accès existant et par la halle souterraine dans laquelle est actuellement installée l'expérience OPAL du LEP.

Avant toute intervention, il faut donc procéder au démontage de cette expérience et de ses équipements annexes, et déposer tous les éléments du LEP situés dans la zone des travaux, lesquels ne peuvent commencer qu'après l'arrêt définitif de la machine. Après ce démontage, les zones prévues pour le creusement des tunnels et chambres sont accessibles et les infrastructures

nécessaires à la conduite des travaux, en conformité avec les exigences du planning, peuvent être mises en place. Tous les travaux sont réalisés en sous-sol à partir d'ouvrages et d'enceintes existants et, par conséquent, ils n'occasionnent pas de nuisances.

Il peut être aussi nécessaire de recourir à l'explosif pour le creusement des galeries de liaison avec le tunnel LEP ; les mêmes contraintes, recommandations et prescriptions d'emploi (horaire des tirs, plans, constitution des charges) que pour les autres chantiers sont appliquées.

Les méthodes mises en œuvre pour l'exécution complète de ces travaux d'excavation ainsi que pour leur revêtement en béton sont les mêmes que celles utilisées pour les tunnels de transfert.

5.2.5

Géotechnique des différents points

Pour assurer un bon déroulement des travaux, un soin particulier a été apporté à la définition et à la conduite des reconnaissances géotechniques, afin d'éviter les surprises qui nécessiteraient un changement de méthode en cours d'exécution (Annexe technique n° 4, "Reconnaissances géologiques et géotechniques pour le LHC"). En outre, ces reconnaissances s'ajoutent à celles effectuées au moment de la construction du LEP et les terrains dans lesquels sont construits les différents ouvrages sont donc connus avec précision.

5.2.5.1

Géotechnique du Point 1

Au Point 1, la caverne destinée à recevoir l'expérience ATLAS ainsi que les puits d'accès posent, par leurs dimensions exceptionnelles en molasse et la présence de contraintes naturelles horizontales élevées, de délicats problèmes de conception et de calcul, notamment en raison de la nécessité de limiter les déformations du massif et des ouvrages existants.

Six nouveaux sondages suivis d'essais géotechniques donnent une bonne connaissance de la géologie locale. L'exécution proprement dite ne doit pas poser de problème majeur dans la mesure où les travaux se déroulent quasi exclusivement en molasse avec une mince couverture morainique non aquifère. Les techniques de creusement sont essentiellement mécaniques pour ne pas perturber la roche en parement. Les techniques de soutènement font appel aux moyens "classiques" de soutènement en rocher comme les ancres, les boulons et le béton projeté.

5.2.5.2

Géotechnique pour le tunnel TI 2

Pour rester confiné dans la molasse, le tunnel TI 2 qui relie le site de Meyrin du CERN au Point 2, présente un tracé en V avec un point bas au droit du sillon de Saint Genis-Pouilly. Ce secteur a été prospecté avec soin grâce à cinq sondages. A cet endroit, la couverture rocheuse se réduit à 10 m. Cette valeur reste largement suffisante car elle représente trois fois le diamètre excavé. Le creusement du tunnel, effectué mécaniquement d'abord en descendant puis en

montant depuis le PMI 2 situé sur le site de Meyrin du CERN, ne doit pas poser de problème particulier, compte tenu de la quasi-imperméabilité de la molasse

5.2.5.3

Géotechnique du Point 2

L'approfondissement du puits existant et la galerie technique à construire se situent intégralement dans la molasse. La qualité du terrain est telle que ces travaux ne doivent poser aucun problème d'exécution.

5.2.5.4

Géotechnique du Point 5

Dix sondages entièrement carottés ont été réalisés, complétés par des essais géotechniques.

Les formations fluvio-glaciaires et morainiques du Point 5 se caractérisent par :

- leur épaisseur considérable (46 à 50 m),
- leur hétérogénéité : dominante gravelo-sableuse, avec zones de limon, de sable, de limon graveleux plus ou moins argileux,
- la présence généralisée de cailloux et de blocs (diamètres fréquents carottés : 10 -20 cm avec possibilité de dimensions bien supérieures),
- leur compacité élevée (résistance au battage SPT très généralement supérieure à 60 coups/30 cm),
- leur perméabilité variable allant de 10^{-7} m/s (moraines limoneuse et limono-argileuse) à environ 5×10^{-3} m/s dans certains horizons des graviers fluvio-glaciaires ou des cailloutis morainiques profonds,
- leur caractère aquifère dès 10 m de profondeur environ.

Ces formations doivent être traversées sur une cinquantaine de mètres d'épaisseur par les deux puits projetés, le PX 56 et le PM 54. Les conditions géotechniques de chacun de ces deux ouvrages (PX 56 : sondages SLHC 30 et SLHC 32 ; PM 54 : SLHC 31 et SLHC 33) sont similaires, la molasse étant un peu moins profonde au PM 54, environ 46 m contre 50 m au PX 56.

Dans la mesure où le rabattement de la nappe par pompage est exclu aussi bien pour des raisons techniques que d'impact sur l'aquifère, les puits sont à réaliser à l'abri d'une enceinte étanche.

Diverses solutions sont envisageables pour exécuter ces enceintes, toutefois, par leur compacité, leur hétérogénéité et la présence de blocs, les terrains se prêtent en principe mal à l'utilisation du "jet grouting" ¹. La technique de la paroi moulée a été utilisée avec difficulté mais avec succès au Point 4 lors de la construction du LEP, dans des conditions cependant moins défavorables. Lors

1. Procédé consistant à renforcer le terrain en place. L'enceinte de protection des travaux est réalisée par brassage du terrain en place par un coulis de ciment injecté à haute pression via des forages verticaux rapprochés.

de la construction du LEP, c'est la congélation qui avait été mise en œuvre avec succès pour le puits du Point 5. Cette solution semble donc être la plus sûre.

La molasse se présente au Point 5 sous un faciès classique d'alternances de grès, de marnes et de marnes gréseuses, en bancs assez réguliers à l'échelle du site et faiblement inclinés (environ 10%) vers le sud-ouest.

Les marnes gréseuses et les grès sont relativement durs. Les marnes comportent des niveaux tendres. La perméabilité est très faible. La couverture de molasse est de 22 à 24 m au droit de la caverne principale UXC 55, soit à peu près le diamètre de celle-ci. La caverne voisine USC 55, de 18 m de diamètre, bénéficie d'une couverture plus épaisse (26 à 30 m).

La présence de deux cavernes voisines et la couverture molassique restreinte rendent délicat le creusement exclusivement mécanique de ces ouvrages, et nécessitent un phasage et un soutènement soigneusement étudiés.

5.2.5.5

Géotechnique du Point 6

Au Point 6, les deux ouvrages d'une certaine ampleur sont les chambres terminales abritant les absorbeurs de faisceau. Elles se situent dans une molasse de bonne qualité, bénéficiant d'une couverture rocheuse surabondante de 65 m à 85 m (sondage SLHC 40 pour l'absorbeur de faisceau nord-ouest et sondage SLHC 41 pour l'absorbeur de faisceau sud-est).

Leur creusement ne pose pas de difficulté technique particulière autre que celle, en l'absence de puits, d'avoir à évacuer les déblais par le Point 6 via le tunnel existant.

Deux sondages ont été effectués pour connaître la qualité de la molasse au niveau des deux absorbeurs de faisceaux.

5.2.5.6

Géotechnique du Point 7

Si la réalisation d'un puits d'accès à la chambre souterraine UR 75 était nécessaire, la qualité médiocre des terrains quaternaires au Point 7 et leur saturation impose de le creuser l'éventuel puits au travers de ces formations à l'abri d'une enceinte étanche, fichée dans la molasse.

Dans ce cas, il est a priori prévu d'utiliser la paroi moulée, technique bien adaptée aux conditions locales et sans incidence sur l'environnement. Le diamètre du puits (9 m) devrait permettre un creusement en molasse avec des moyens mécaniques.

La caverne creusée en tréfonds avec une couverture molassique importante ne présente aucune difficulté particulière. Un sondage a été effectué pour qualifier la molasse.

5.2.5.7

Géotechnique pour le tunnel TI 8 et le puits PGC 8

Le tunnel TI 8 est confiné dans la molasse. Quatre sondages ont été réalisés le long du tracé. La couverture rocheuse d'une vingtaine de mètres se réduit à 13-14 m au voisinage de la frontière franco-suisse. Cette valeur reste cependant tout à fait suffisante, d'autant plus que la moraine de recouvrement est étanche.

Son creusement effectué mécaniquement et en descendant ne devrait pas poser de problème particulier, compte tenu de la quasi-imperméabilité de la molasse.

La méthode de creusement du puits, mécanique ou à l'explosif, est choisie en fonction des contraintes techniques et de la sensibilité du faisceau SPS aux ébranlements.

Le soutènement provisoire du tunnel est assuré par du béton projeté, son revêtement définitif par du béton coffré. Le puits ne reçoit pas de revêtement en béton coffré.

5.2.5.8

Géotechnique du Point 8

Au Point 8, la couverture vis-à-vis des cailloutis morainiques profonds aquifères au droit de l'ouvrage projeté est d'une quinzaine de mètres de molasse, complétée d'une épaisseur équivalente de moraine rissienne étanche. La réalisation de l'extension nécessaire à l'expérience pose uniquement des problèmes d'interaction avec la structure de la halle existante UX 85.

5.3

Conduite des travaux en surface

Les chantiers des travaux de surface respectent les horaires réglementaires de travail de jour (voir paragraphe 5.1.3) et cela 5 jours par semaine, avec possibilité de travail exceptionnel le samedi le cas échéant. Les jours fériés locaux sont impérativement respectés.

La construction des bâtiments de surface aux Points 1 et 5 commence avant l'achèvement des travaux souterrains et implique donc une cohabitation des deux types de chantiers. Cette cohabitation est toutefois grandement facilitée par le fait que l'on a affaire à la même entreprise ou au même groupement d'entreprises dans les deux cas. Les seuls éléments notables en surface consistent dans l'arrivée d'un parc de matériel plus spécifique (engins de terrassement de surface, grues à tour d'une certaine hauteur, grues mobiles de montage, augmentation des baraquements de chantier ...).

5.3.1

Les bâtiments

On distingue les bâtiments construits entièrement en béton et les bâtiments à ossature et bardage métalliques, comme c'était déjà le cas pour le LEP.

Les bâtiments construits en béton sont destinés à abriter des appareillages bruyants, les compresseurs pour la cryogénie et la ventilation. Ils sont conçus de manière à former une excellente isolation phonique (voir chapitre 8) limitant la transmission sonore vers l'extérieur, notamment par leurs divers ouvertures et accès (souches de ventilation, portes, etc.), mais aussi par la toiture. Cette conception, utilisée pour les bâtiments du LEP, a été perfectionnée grâce à l'expérience acquise.

Les bâtiments à ossature et bardage métalliques sont essentiellement les bâtiments qui coiffent les puits d'accès aux installations souterraines. Ils servent notamment à la manutention, au stockage et au transfert d'équipements entre la surface et le tréfonds. Leur construction consiste en une structure de base en béton sur laquelle s'appuie une superstructure métallique qui supporte un double bardage en acier prélaqué ainsi que la toiture.

5.3.2

Les aires de stockage d'hélium

Sur les aires de stockage, les réservoirs d'hélium sont pour la plupart disposés par modules de 6, sur deux niveaux. La position de ces aires sur les différents sites a été choisie de manière à les rendre aussi peu visibles que possible depuis l'extérieur et leur aspect est amélioré par le choix d'une teinte neutre pour les réservoirs. Les quelques réservoirs verticaux prévus en sus sont conçus de façon à ce que leur hauteur et leur teinte soient en harmonie avec celles des bâtiments voisins.

5.3.3

Voiries et réseaux divers

Tous les réseaux de transport de fluides (eau, électricité) ou de télécommunication sont, comme pour le projet LEP, entièrement enterrés et transitent le long des voies d'accès ou dans les terrains mis à la disposition du CERN, en empruntant au maximum les infrastructures déjà créées.

A l'intérieur des sites, les distributions se font au travers des galeries techniques ou des caniveaux implantés dans le sol, évitant ainsi tout cheminement aérien disgracieux et éventuellement source de bruit.

5.3.4

Espaces verts et clôturés

Avec le concours d'architectes paysagistes, le CERN porte une attention toute particulière :

- à la remise en l'état des zones occupées temporairement par certains chantiers ;

- à l'aménagement des zones de dépôt des déblais (notamment en créant des lieux de détente ou en recréant des zones de pâturages) ;
- à l'embellissement immédiat des sites concernés, par le remodelage du terrain, la plantation (dès le début des travaux partout où c'est possible) d'arbres et d'arbustes d'essences adaptées à la région, la création d'espaces verts et de massifs arborés entretenus régulièrement par la suite, etc. ;
- à l'édification des clôtures, d'abord opaques pendant la durée des travaux, puis plus transparentes (du même type que celles existant pour le LEP) lorsque les sites entrent dans leur phase d'exploitation. Les clôtures dans leur aspect définitif répondent à un double objectif de sécurité et de discrétion.

5.4

Les installations de chantiers

5.4.1

Généralités

Le CERN fait valoir auprès de ses contractants un certain nombre d'exigences en matière d'installation de chantiers, en particulier :

- Aux Points 1 et 5, une partie des déblais est déposée autour de la zone de chantier pour constituer un écran antibruit qui, après revêtement de terre végétale et plantation, reste définitivement en place. Les surfaces de roulement sont imperméabilisées si elles ne le sont pas déjà.
- Les surfaces de chantier reçoivent une couche de tout-venant sur un géotextile pour éviter toute interpénétration des moraines en place.
- Un nombre minimum d'arbres est enlevé ; ils sont soit replantés soit remplacés suivant les cas.
- Les bungalows des Directions des Travaux (à l'usage du CERN, des bureaux d'études et des entreprises) sont livrés en très bon état et entretenus de façon à le rester pendant toute la durée des chantiers. Il en est de même des entrepôts, ateliers et autres locaux annexes.
- Les clôtures sont de type plein en acier prélaqué de couleur neutre ou en bois, lorsque aucune clôture du CERN n'est déjà en place.
- L'accès à la zone de chantier est équipé d'un portail fermant à clef, de même hauteur que les clôtures.

D'une façon générale, le CERN veille à ce que chaque zone de chantier demeure propre et ordonnée.

5.4.2

Emplacements des chantiers pour chaque site

A tous les points situés autour de l'anneau LEP/LHC correspondent des chantiers de surface d'importances variables. Pour les Points 1.8, 2, 6 et 8, ces chantiers sont confinés à l'intérieur des enceintes existantes.

Pour les Points 1, 3, 4, et 5, ils nécessitent une extension des emprises actuelles. Enfin, si, en raison d'impératifs techniques, le puits d'accès devait être réalisé au Point 7.2, une implantation nouvelle mais réduite serait nécessaire (commune de Collex-Bossy).

Le chantier du puits de génie civil PGC 8, situé près du Point d'accès BA 4 du SPS à Prévessin-Moëns (voir figure 4.5 à la page 87), se déroule hors des clôtures du BA 4 sur un terrain de l'Etat français mis à la disposition du CERN lors de la construction du SPS. L'accès à la route RD 35 se fait par l'entrée du site existant.

Le puits de génie civil PMI 2 et le bâtiment SDI 2 qui le coiffe sont situés au bout du site de Meyrin du CERN, sur le territoire de la commune de Saint Genis-Pouilly.

Avec l'accord de l'Administration des Douanes, la clôture du site de Meyrin est déplacée pour le séparer de ce chantier. L'accès au chantier se fait par une bretelle à construire connectée au rond-point RD 35/RD 984.

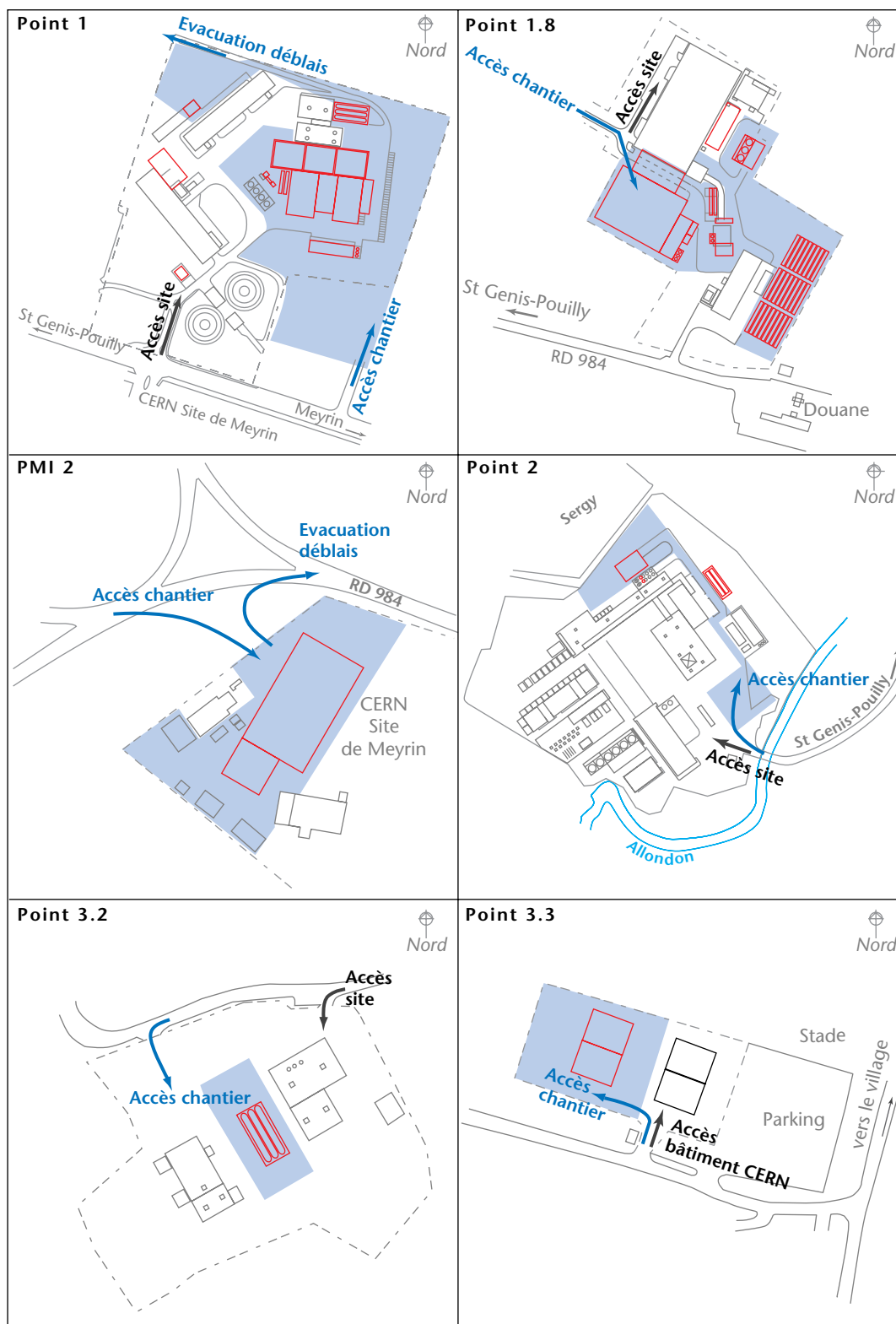


Figure 5.8 Emplacement des installations de chantier : du Point 1 au Point 3.3

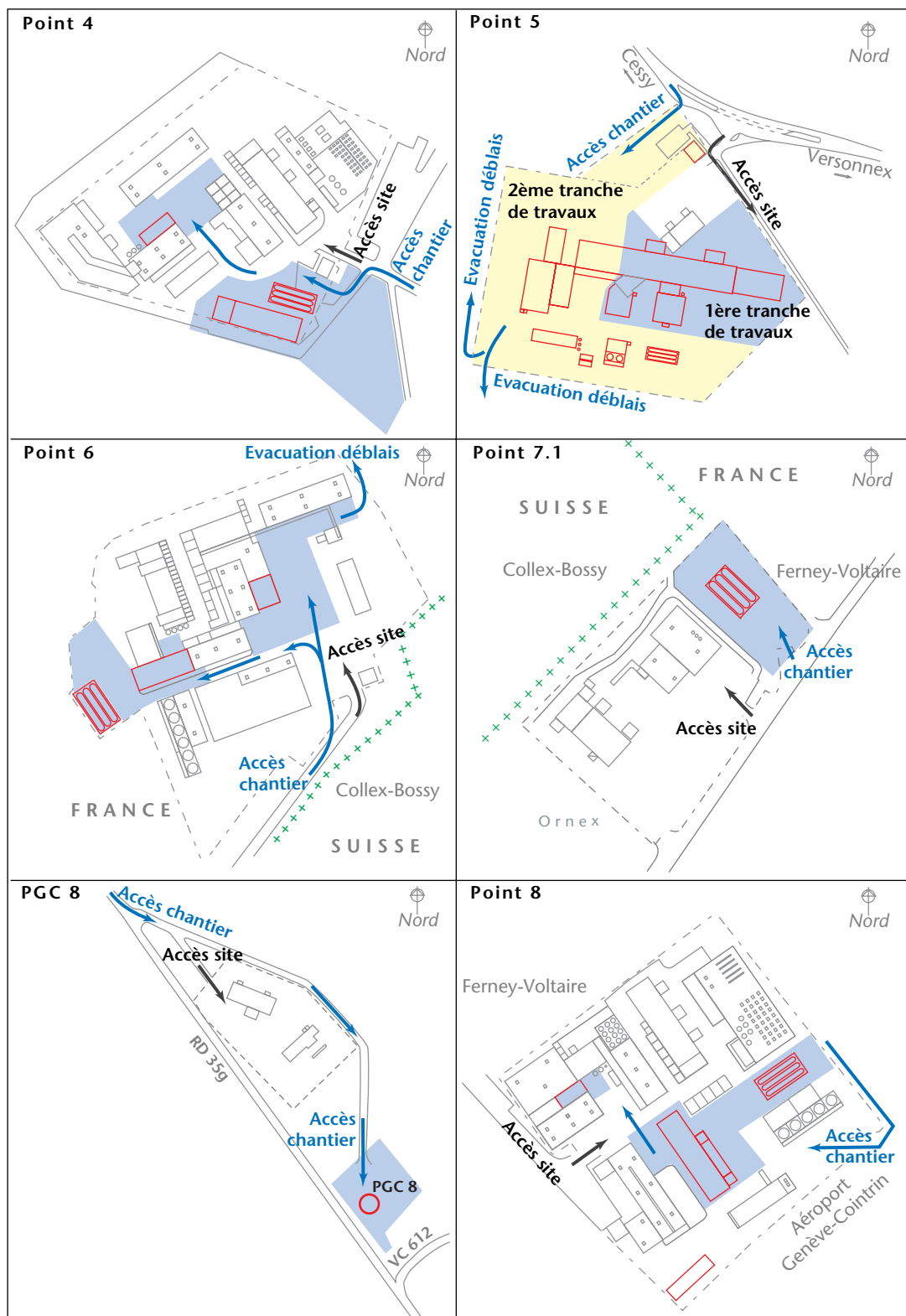


Figure 5.9 Emplacement des installations de chantier : du Point 4 au Point 8

5.4.3**Hébergement du personnel pendant les chantiers**

La construction du LHC s'articule en deux temps : le chantier de génie civil d'une part, le montage de la machine et des expériences d'autre part. Pour le chantier de génie civil, des zones d'hébergement sont prévues, l'une à Cessy (figure 5.10) sur un terrain mis à disposition par la commune, l'autre à Préveessin-Moëns (figure 5.11) sur un emplacement déjà utilisé lors de la construction du LEP.

Le personnel qui y réside bénéficie de la proximité des diverses infrastructures commerciales locales. En effet, l'expérience du LEP a montré l'importance pour le personnel concerné, en règle générale peu mobile, de la possibilité de s'approvisionner sur place.

La répartition géographique équilibrée de ces zones, à la fois proches des principales zones de travaux et éloignées entre elles, garantit leur bonne intégration dans le territoire.

Le montage de la machine et des expériences commence environ quatre ans après le début du chantier de génie civil. En effet, ces travaux ne peuvent être réalisés qu'une fois le LEP démonté et les travaux de génie civil achevés aux endroits concernés.

Un personnel spécialisé est chargé de la mise en place de la machine et des expériences. Pour ce type de chantier, le personnel se loge généralement à l'hôtel, en appartement, ou en caravane. Le parc hôtelier est suffisamment développé pour pouvoir absorber les demandes, et le marché immobilier gessien permet de couvrir les besoins nouveaux.

En ce qui concerne les monteurs vivant dans leur caravane, deux solutions sont possibles. Dans le cas où une commune gessienne manifesterait son intérêt pour accueillir une telle zone sur son territoire, le CERN participerait à la mise en place de l'infrastructure nécessaire.

L'intérêt de cette solution a pu être apprécié lors de la construction du LEP. En contrepartie de la mise à disposition du terrain, ce type d'infrastructure reste acquis à la commune en fin de chantier pour ses propres besoins. A Gex, la zone LEP a été reconvertie en caravaning touristique, tandis qu'elle est devenue une zone artisanale à Crozet et Thoiry.

Si cet équipement ne devait être souhaité par aucune commune, le CERN dispose d'une zone aménagée lors de la construction du SPS à Préveessin-Moëns. Cette zone est située sur les terrains de l'Etat français mis à la disposition de l'Organisation, et peut être réutilisée si nécessaire (figure 5.12).

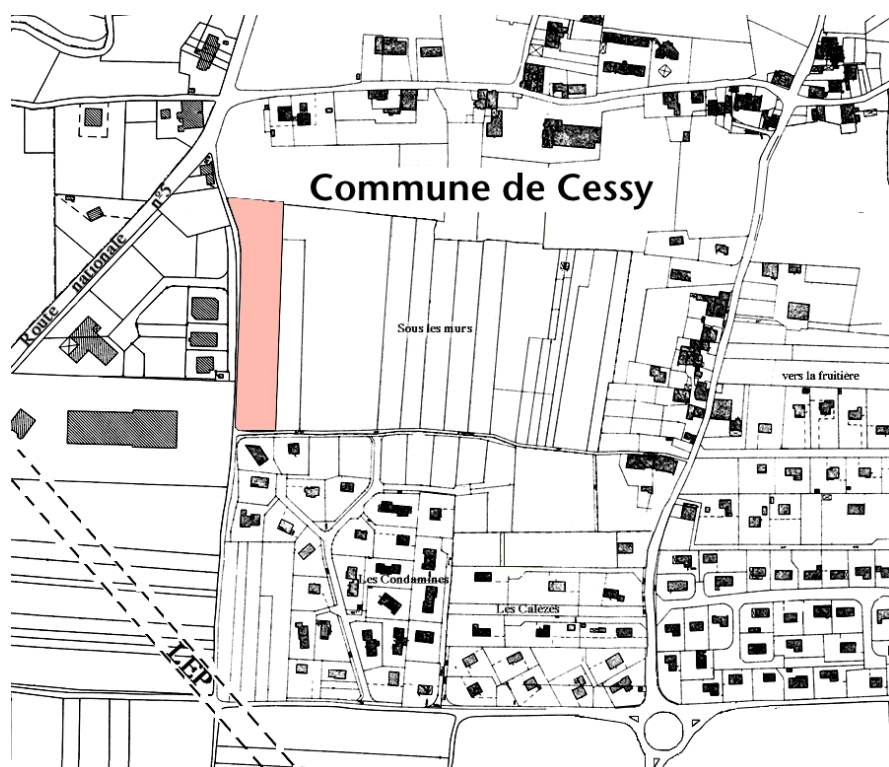


Figure 5.10

Zone d'hébergement de Cessy

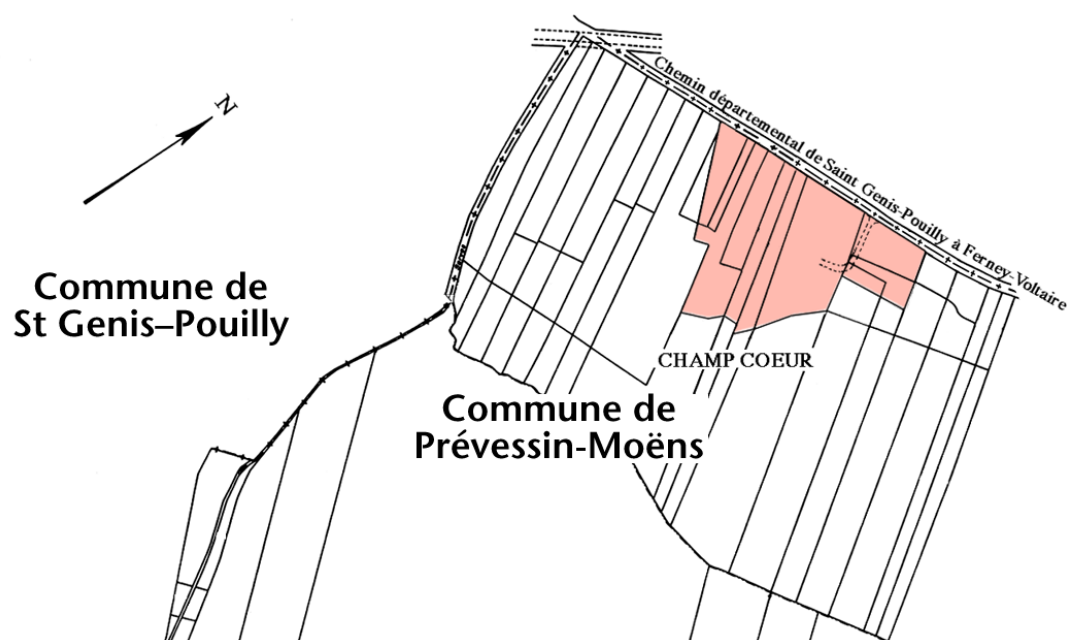
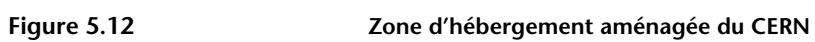


Figure 5.11

Zone d'hébergement de Prévessin-Moëns



6

L'environnement dans son état initial

6.1

Géographie

Le Pays de Gex appartient géographiquement au bassin genevois. Sa séparation avec le canton de Genève est le fait d'une frontière politique échappant à la géographie physique. Le bassin genevois est limité à l'est par le lac Léman et, à l'ouest, par la chaîne du Jura. Ainsi, topographiquement, d'est en ouest, trouve-t-on successivement une plaine et une barrière montagneuse. La première, d'une altitude moyenne de 450 à 500 m, est relativement plate ; elle est le siège des principales activités humaines, agricoles, industrielles, commerciales et de l'habitat. La haute chaîne du Jura, quant à elle, culmine au Crêt de la Neige (1 718 m).

C'est une zone à caractère naturel, principalement couverte de forêt jusqu'à 1 300 m d'altitude. Au-dessus de ce niveau, les alpages deviennent prédominants. Des activités touristiques d'été et d'hiver se développent à partir des cols de Crozet et de la Faucille et une réserve naturelle a été créée.

Aucune des zones de travaux prévues pour le LHC ne se trouve dans ou à proximité immédiate du périmètre de la haute chaîne.

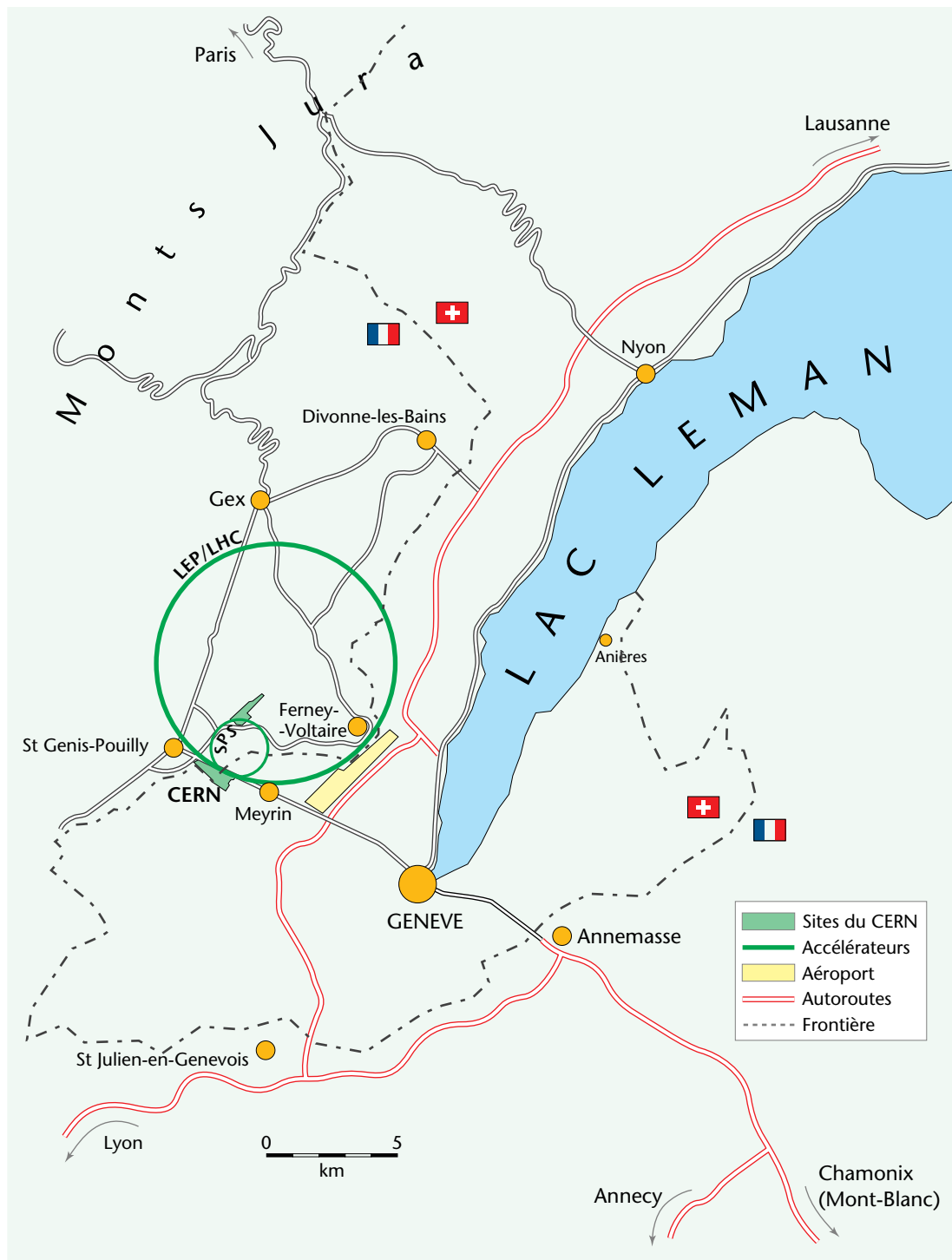


Figure 6.1

Carte de situation

6.2

Conditions climatiques

Les conditions climatiques de la zone d'implantation du LHC sont bien connues, grâce notamment aux mesures météorologiques effectuées par l'Office fédéral de la météorologie suisse à l'aéroport de Genève-Cointrin. Les statistiques présentées portent sur une période de 25 ans. Elles relèvent l'ensoleillement, la température, les précipitations et l'humidité relative (voir figures 6.2 et 6.3).

Il est intéressant de noter que la température moyenne des années 1982-1995 fut légèrement plus élevée que celle des années 1970-1980. Les fluctuations des précipitations mensuelles sont importantes.

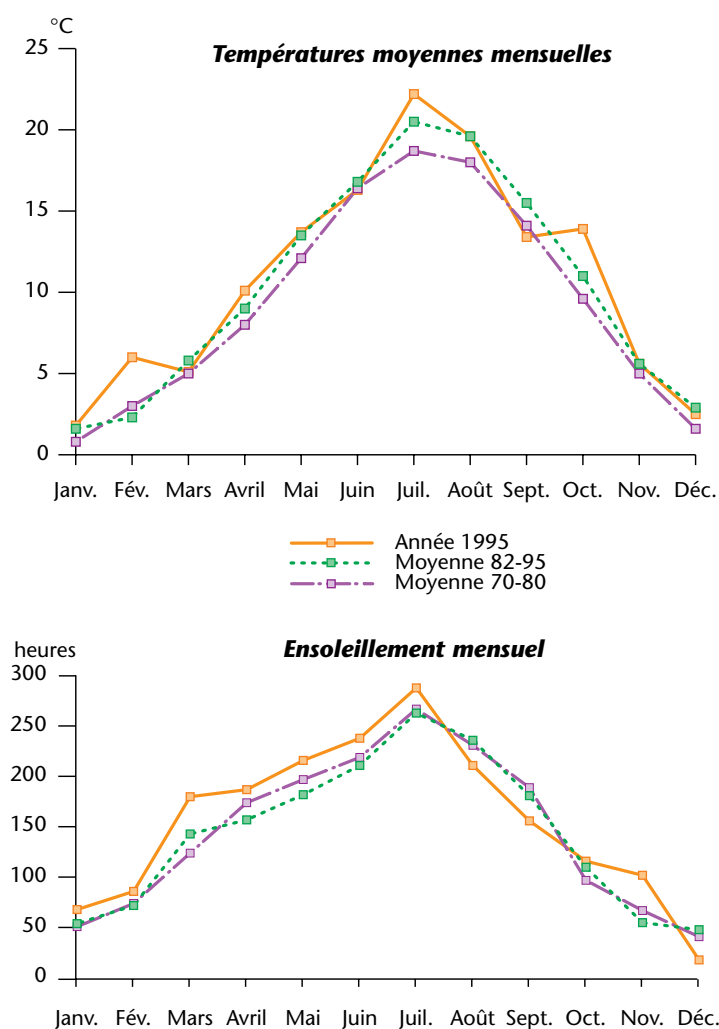


Figure 6.2

Températures moyennes et ensoleillement mensuels à Genève-Cointrin de 1970 à 1995

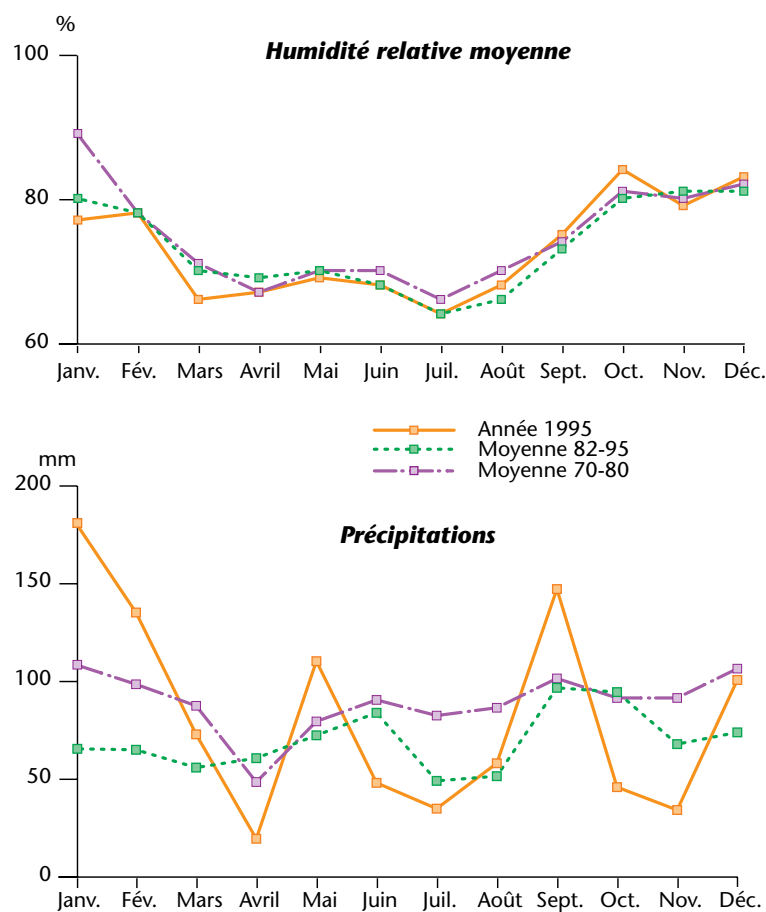


Figure 6.3

Humidité relative et précipitations mensuelles à Genève-Cointrin de 1970 à 1995

En ce qui concerne la direction des vents dominants, la figure 6.4 illustre clairement l'existence de deux régimes qui s'inscrivent dans un axe sud-ouest/nord-est. Les mesures effectuées à l'aéroport de Genève-Cointrin sur la période 1982-1995 montrent le passage progressif d'un régime de vents du sud-ouest dominants du mois de septembre au mois de février, à un régime de vents du nord-est dominants le reste de l'année.

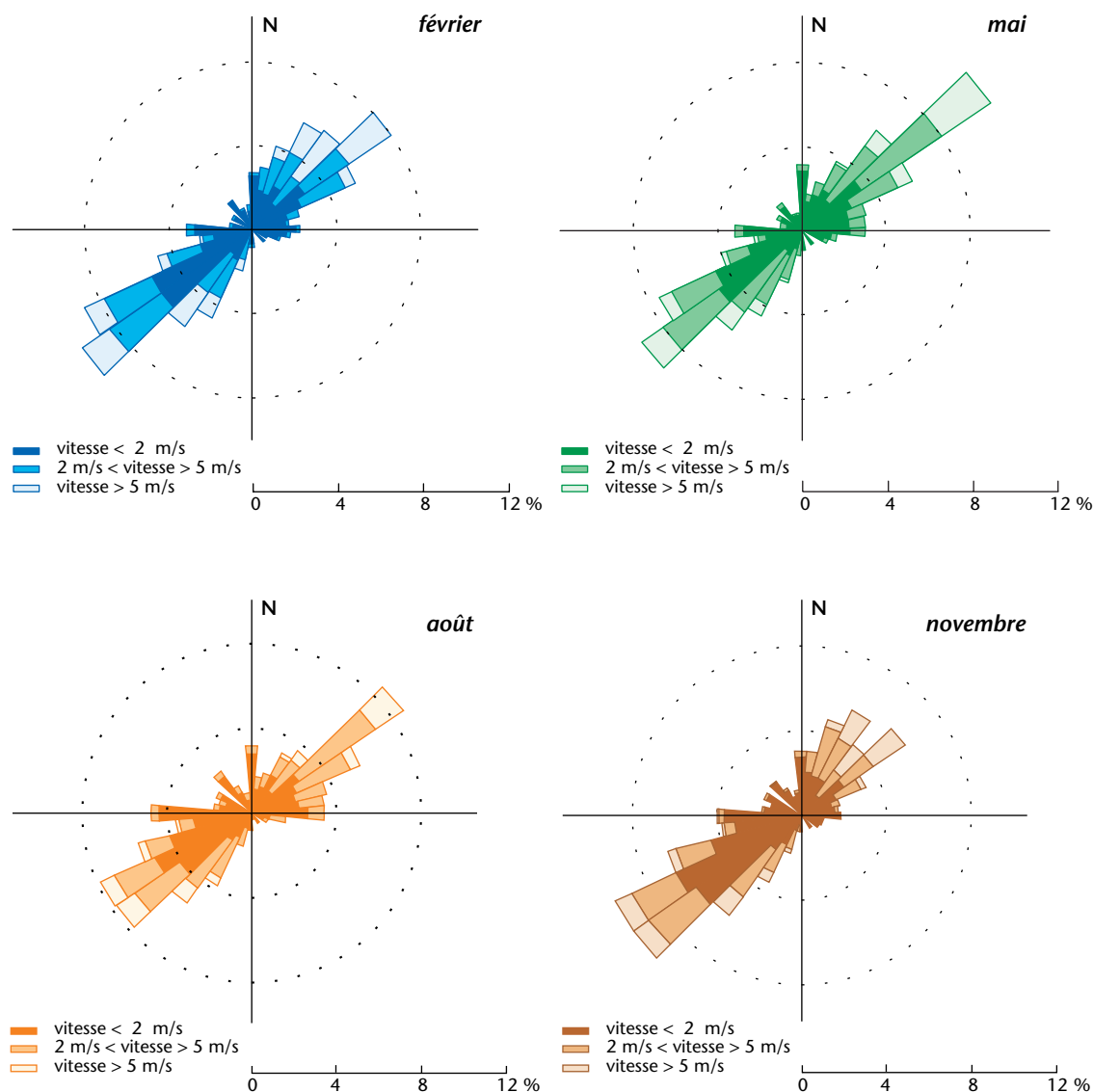


Figure 6.4

Vents enregistrés à Genève-Cointrin de 1982 à 1995

Ces données générales sont complétées par les mesures locales effectuées par des stations météorologiques installées aux points d'accès du LEP depuis 1984¹. Les paramètres mesurés sont la température, l'humidité relative, la pression barométrique et l'enthalpie. Ces mesures sont utiles pour optimiser le fonctionnement des installations de traitement d'air assurant le chauffage, la ventilation, le refroidissement et la déshumidification des installations souterraines. Pour le LHC, des capteurs de force et de direction du vent sont intégrés aux

1. Au cours de la construction du LEP, cinq stations météorologiques ont été mises en place progressivement sur le périmètre de l'anneau à Cessy, Crozet et Echenevex en France, Mategnin et Meyrin en Suisse.

sondes de température, aux sondes de point de rosée et de pression atmosphérique. Ces capteurs sont installés au Point 1 à Meyrin (Suisse), aux Points 2, 4, 5, 6 et 8, respectivement situés à Sergy, Echenevex, Cessy, Versonnex et Ferney-Voltaire (France).

Certains aspects significatifs connus des Gessiens ont pu être observés. Ainsi, le Jura modifie localement l'écoulement de l'air. Le Jorand est un vent qui balaie le pied de la montagne. En conséquence, on a parfois pu observer une différence instantanée de température allant jusqu'à 10 °C entre les Points 4 (Echenevex) et 8 (Ferney-Voltaire).

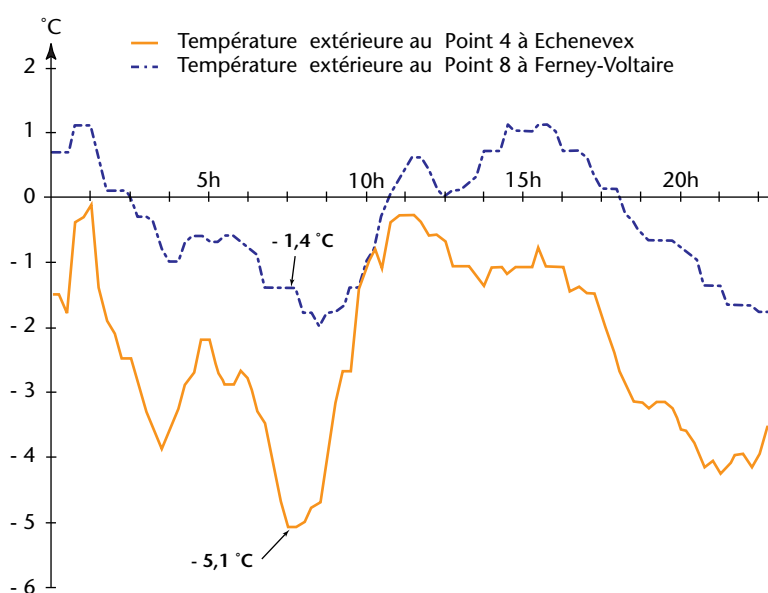


Figure 6.5

Variations de la température extérieure aux Points 4 et 8 le 9 février 1996

6.3

Géologie

Du fait de la construction du LEP, le contexte géologique du projet LHC est bien connu.

Le projet LHC ne touche aucune formation géologique qui n'aurait pas été rencontrée lors des travaux du LEP. Au contraire, les travaux prévus vont bénéficier des observations et des enseignements des chantiers antérieurs.

6.3.1

Géologie générale

Le projet LHC s'insère dans un contexte géologique relativement simple. Il s'agit d'une part de la terminaison sud du bassin molassique suisse, qui forme

une vaste “cuvette”¹, d’autre part de la première chaîne du Jura, l’anticlinal du Reculet (voir figure 6.6 à la page 172). Le bassin molassique, comme une part importante du piémont de la chaîne du Jura, est recouvert par des formations quaternaires épaisses et variées, déposées entre autres par les glaciers quaternaires. Ces formations sont bien évidemment traversées par certains des ouvrages prévus.

Nous allons donc successivement analyser les formations quaternaires, la molasse tertiaire et les formations de la première chaîne du Jura. Puis nous décrirons l’histoire géologique de cette région et les différents éléments paléogéographiques et tectoniques qui peuvent concerner le projet.

Les nouveaux ouvrages prévus sont tous creusés dans la partie correspondant au bassin molassique évoqué plus haut. Seules les formations quaternaires et la molasse sont donc traversées ou excavées.

6.3.1.1

Les formations quaternaires

Les formations quaternaires rencontrées tant en surface que dans des forages, dans la partie nord du canton de Genève, dans le Pays de Gex et sur les pentes du Jura, sont nombreuses et très variées, mais elles ne sont pas toujours identifiables de manière très précise et les critères classiques de la stratigraphie ne s’appliquent que rarement à la détermination de ces formations. Il s’agit des formations de l’Holocène, des formations glaciaires et fluvio-glaciaires du Würm et des dépôts du Riss. Ces différentes formations sont décrites et classées ci-après, selon la nomenclature généralement admise dans le canton de Genève.

Les formations de l’Holocène comprennent les remblais, colluvions, formations de couverture et les alluvions. Il s’agit essentiellement des remblais créés par l’homme, de la terre végétale et des colluvions. Ces derniers se trouvent surtout sur les pentes du Jura. Ces formations sont très variées et le plus souvent peu perméables. Les alluvions récentes correspondent aux dépôts les plus récents déposés par les cours d’eau du secteur, à savoir l’Allondon et ses affluents le Journans, l’Oudar et le Lion. Il s’agit toujours de galets et graviers roulés, avec des lentilles sablo-argileuses. Ce matériau provient du remaniement des autres formations quaternaires. L’épaisseur et l’extension de ces alluvions sont faibles. Il est très difficile de les différencier des alluvions fluvio-glaciaires würmiennes dont elles tirent une grande partie de leurs éléments.

On peut trouver trois types de formations glaciaires et fluvio-glaciaires, liées aux passages des glaciers würmiens, et deux types de dépôts anté-würmiens. Il s’agit d’abord des moraines dites de retrait recouvrant les zones en relief qui séparent les grands sillons du Pays de Gex et de la partie nord du canton de Genève. Il s’agit là d’argiles à blocs, en faible épaisseur. Lorsqu’on se déplace vers l’axe des sillons, ces dépôts passent en continuité à des alluvions fluvio-glaciaires, c’est-à-dire à des éléments détritiques arrachés aux moraines, triés et

1. Synclitorium

ensuite déposés en lentilles très allongées par les eaux de fonte du glacier du Rhône. La perméabilité peut être assez forte. Toujours dans les sillons, sous ces alluvions, on trouve des dépôts intra-morainiques représentés par des niveaux très hétérogènes de cailloutis, galets, graviers, sables et argiles. On trouve ensuite les cailloutis morainiques profonds ou alluvions anciennes. Il s'agit surtout d'alluvions assez propres qui sont souvent très perméables.

On attribue à la glaciation du Riss les moraines de fond rencontrées sous les cailloutis morainiques au contact de la molasse. Il s'agit de niveaux argileux avec des passées sableuses ou graveleuses et des blocs. Lors du dépôt des alluvions fluvio-glaciaires une partie de ces moraines de fond a pu être remaniée et il n'est pas toujours facile de distinguer les deux formations lors des sondages.

6.3.1.2

La molasse tertiaire

La molasse tertiaire comprend, dans cette partie du bassin de Genève, deux termes principaux : la molasse grise et la molasse rouge. En fait, dans le secteur du LEP, seule la molasse rouge est présente. Cette dernière est composée de trois niveaux : un niveau supérieur bigarré (ou marnes bariolées), les calcaires de Grilly et la gompholite. Ces trois niveaux sont datés du Chatien.

Le niveau supérieur de la molasse rouge est, dans cette partie du bassin, le fruit de dépôts en eau douce. Ces dépôts se sont produits au sommet du Chatien inférieur et à la base du Chatien supérieur (Oligocène). Il ne s'agit pas, et de loin, d'un matériau homogène. Les dépôts sont essentiellement lenticulaires, avec souvent des hétérogénéités au sein d'un même niveau. On observe des niveaux gréseux, des niveaux gréso-marneux et des niveaux marneux. La dureté peut varier beaucoup d'un banc gréseux à l'autre.

Les calcaires de Grilly constituent aussi un dépôt d'eau douce. Il s'agit d'une molasse très calcaire mais où l'on trouve encore des grains de quartz. Ils représentent la partie sommitale du Chatien inférieur.

La gompholite a été très bien observée, en plusieurs points, lors des travaux de creusement du LEP. Cette formation regroupe tous les dépôts de transgression, à la base de la série molassique (en particulier les Poudings de Mornex). On y trouve des conglomérats à éléments provenant des formations sous-jacentes, des niveaux de galets et graviers roulés et propres, des niveaux d'argiles très pures, des grès et des marnes rouges ou lie de vin. Cette grande variété de faciès explique les nombreuses interprétations données dans la littérature.

En fait, il s'agit d'une sédimentation dans une région à relief marqué, avec par endroit des pentes fortes, une morphologie karstique et une couverture d'éboulis. On a vu, lors des travaux souterrains, une galerie karstique fossilisée par des dépôts d'argilite rouge. Cette formation n'a été datée de manière précise qu'à partir des éléments paléontologiques trouvés dans les carottes du forage SPM 5. Elle est attribuée au sommet du Chatien inférieur. Cette datation est un des résultats de géologie fondamentale obtenus à partir des observations

faites lors des travaux du LEP. Des analyses récentes aux rayons X montrent la présence de pyrite (environ 3%) dans la molasse rouge.

Il faut enfin signaler que si la molasse de cette région est quasiment imperméable, elle contient souvent des traces d'hydrocarbures. La répartition de cet élément est tout à fait aléatoire. La présence d'hydrocarbures peut toujours faire craindre celle de méthane. Les différents ouvrages souterrains prévus dans le cadre du projet LHC sont tous excavés dans la partie supérieure de cette molasse rouge.

6.3.1.3

Les formations du Jura

Les formations calcaires et marno-calcaires du flanc de l'anticlinal du Reculet ne sont pas concernées par les travaux du projet LHC. Ces formations rencontrées lors du creusement du tunnel du LEP vont de l'Hauterivien au Purbeckien, c'est-à-dire qu'elles représentent la base du Crétacé inférieur. Il n'y a pas lieu de les décrire à nouveau ici.

Du point de vue de la lithologie des formations secondaires, l'excavation du tunnel du LEP a permis de mettre en évidence la présence de niveaux de brèches intra-formationnelles au sein des calcaires de Thoiry. Ce type de sédimentation en milieu calcaire était connu en de nombreux points des Alpes, dans les calcaires du Bérriasien, mais n'avait jamais été décrit dans le Jura. Cette particularité sédimentologique traduit le résultat de mouvement sur une pente, en milieu marin, de sédiments non encore parfaitement consolidés, entraînant leur rupture en éléments de taille centimétrique et leur consolidation ultérieure en pseudo-brèches. C'est le résultat de séismes.

La partie du Jura concernée correspond à un pli anticlinal chevauchant vers le nord-ouest. On ne connaît pas la nature des formations qui constituent le cœur de ce pli sous le Lias, puisque les formations du Trias n'ont jamais été observées à l'affleurement ou en sondage dans cette partie de la chaîne. La molasse oligocène repose en discordance sur les formations secondaires. Le bassin molassique peut ici être assimilé à un vaste synclinal dont on ne connaît pas la forme exacte. Il est possible d'identifier trois replis anticlinaux peu marqués, alignés parallèlement à la première chaîne du Jura. Ces deux ensembles sont affectés de plusieurs fractures importantes dont la faille de l'Allondon est l'exemple le plus marquant. Ces accidents bien visibles dans le Jura se perdent dans les formations molassiques même si les observations faites dans le tunnel du LEP confirment que la faille de l'Allondon est bien postérieure au dépôt de la molasse.

Lors du percement du tunnel du LEP, les nombreuses failles et fractures détectées par l'étude GEOSAT n'ont pas toutes été recoupées. D'une manière générale, la fracturation s'est avérée beaucoup moins importante que prévue. Si de nombreuses traces de glissement bancs sur bancs ont été observées, ce qui est tout à fait classique dans la partie du pli où passe le tunnel du LEP, de

nombreuses zones de plus de 10 m de long sans trace de fracture ou même de fissures ont été recoupées.

6.3.2

Paléomorphologie

A la fin de l'ère tertiaire, avant l'arrivée de la première glaciation, le lac Léman n'existe pas ; l'altitude du terrain naturel est de l'ordre de 900 à 1 000 m à Genève. Chacune des glaciations va se manifester par une phase d'érosion et chacune des phases interglaciaires va correspondre à une période de sédimentation. La surface de contact actuelle entre la molasse et les formations quaternaires est le résultat de toutes ces phases d'érosion.

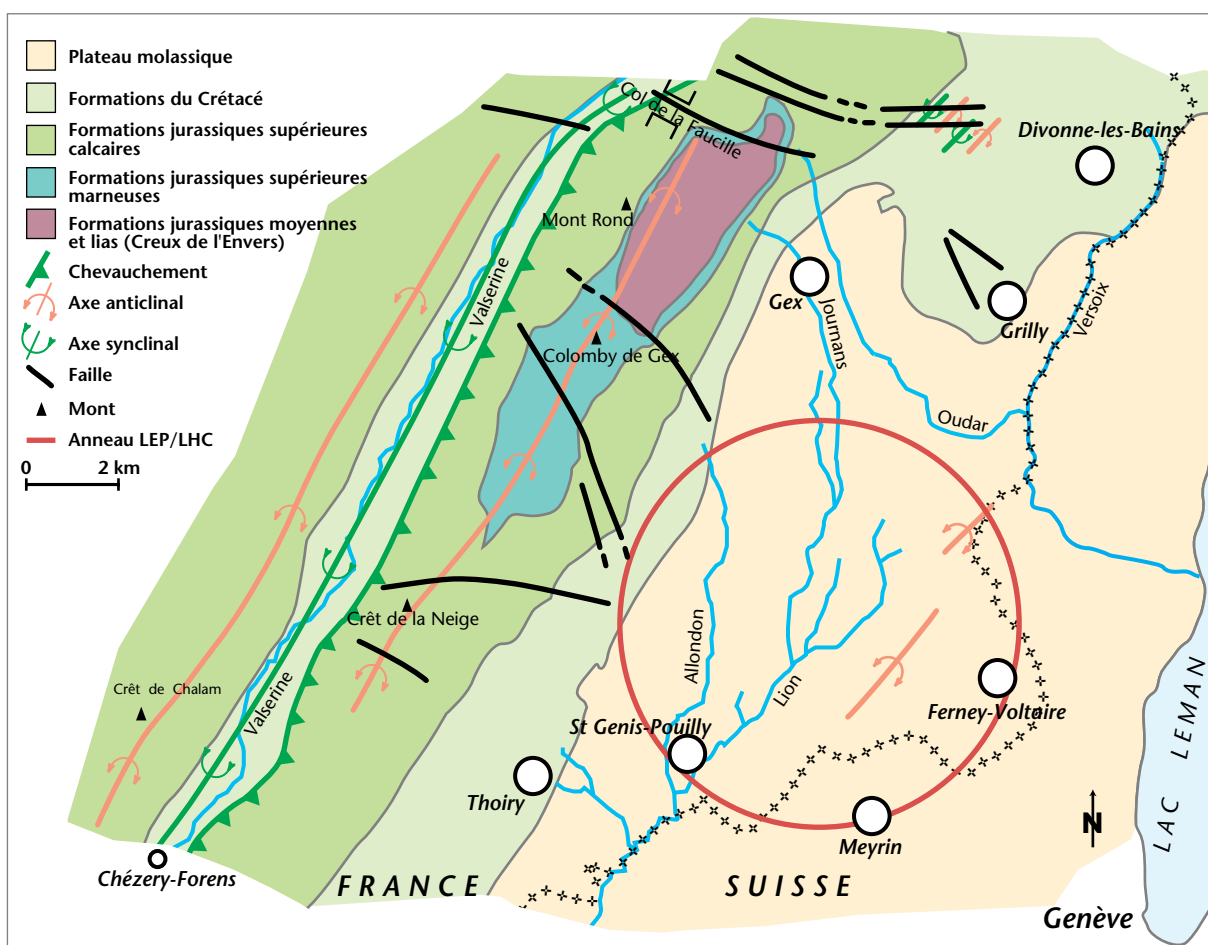


Figure 6.6

Schéma structural et géologie simplifiée

Les grands sillons sont très probablement le résultat du creusement rissien puisque l'on y trouve des sédiments anciens qui n'ont pas été érodés par les glaciations würmiennes. Ils n'ont été que peu modifiés par l'érosion würmienne. La cartographie de ces différents sillons commence à être assez précise tant en ce qui concerne leur position que leur profondeur. L'apport des travaux du LEP et

des sondages de reconnaissance pour le LHC est d'ailleurs considérable dans ce domaine. Cette paléomorphologie présente une importance fondamentale pour les ouvrages souterrains.

Le massif du Jura a été le siège d'une karstification importante qui a commencé lors de l'émersion du massif au cours du Crétacé supérieur. Elle s'est poursuivie à la fin du Tertiaire et pendant le Quaternaire. La plus grande partie du Karst a été comblée par des matériaux argileux, sableux et même des galets provenant du lessivage des moraines déposées sur les pentes du Jura. Mais comme dans d'autres secteurs du Jura, on retrouve des traces d'un remplissage beaucoup plus ancien.

6.3.3

Les formations touchées par le projet

Les nombreux sondages, forages et puits réalisés dans la zone du Point 1 permettent d'avoir une bonne connaissance de la géologie locale. On trouve là une moraine épaisse de 3 à 5 m qui repose directement sur la molasse. On y trouve essentiellement des argiles à galets ou à blocs.

Au Point 2, les formations superficielles sont là aussi bien connues, notamment grâce à la construction du LEP. La galerie technique UL 2 est entièrement excavée dans la molasse grise. Il ne doit pas y avoir de problème particulier lors de sa construction.

Au Point 3, il n'y a pas de travaux souterrains. Seuls des aménagements mineurs sont prévus au Point 4.

Le site du Point 5 se trouve sur le sillon de l'Oudar. Le substratum molassique se trouve là entre 30 et 40 m de profondeur. Les formations quaternaires rencontrées dans les différents forages montrent une alternance très hétérogène de niveaux d'argiles, comportant souvent des galets, et de niveaux d'alluvions plus propres. On peut y distinguer un niveau superficiel de 8 à 10 m d'épaisseur très argileux, puis un niveau d'alluvions grossières peu argileuses dont l'épaisseur varie beaucoup, puis un nouveau niveau très argileux et enfin, un dernier niveau constitué d'alluvions grossières.

Les salles contenant les arrêts de faisceaux doivent être excavées au Point 6. Toutefois, pour les deux tunnels de 750 m de longueur tangents au LEP, seuls les 250 derniers mètres se situent hors du tunnel actuel. Ces deux ouvrages sont entièrement excavés dans la molasse grise. Aucun puits n'est prévu.

Les moraines présentes au Point 7 sont composées d'argiles avec des galets essentiellement granitiques et quelques blocs.

L'alcôve réalisée au Point 8 pour agrandir la halle souterraine actuelle est entièrement excavée dans la molasse.

Le tunnel de transfert TI 2 est excavé dans la molasse sur toute sa longueur. D'une manière générale, les conditions géologiques sont favorables. Les seuls

problèmes qui puissent se poser sont ceux liés aux différences de nature et donc de dureté de la molasse grise. Cela ne relève que de la géotechnique.

Le tunnel de transfert TI 8 est entièrement excavé dans la molasse grise, assez profondément sous la surface de contact avec les formations quaternaires. Certains niveaux très cimentés peuvent être rencontrés.

6.4

Séismicité

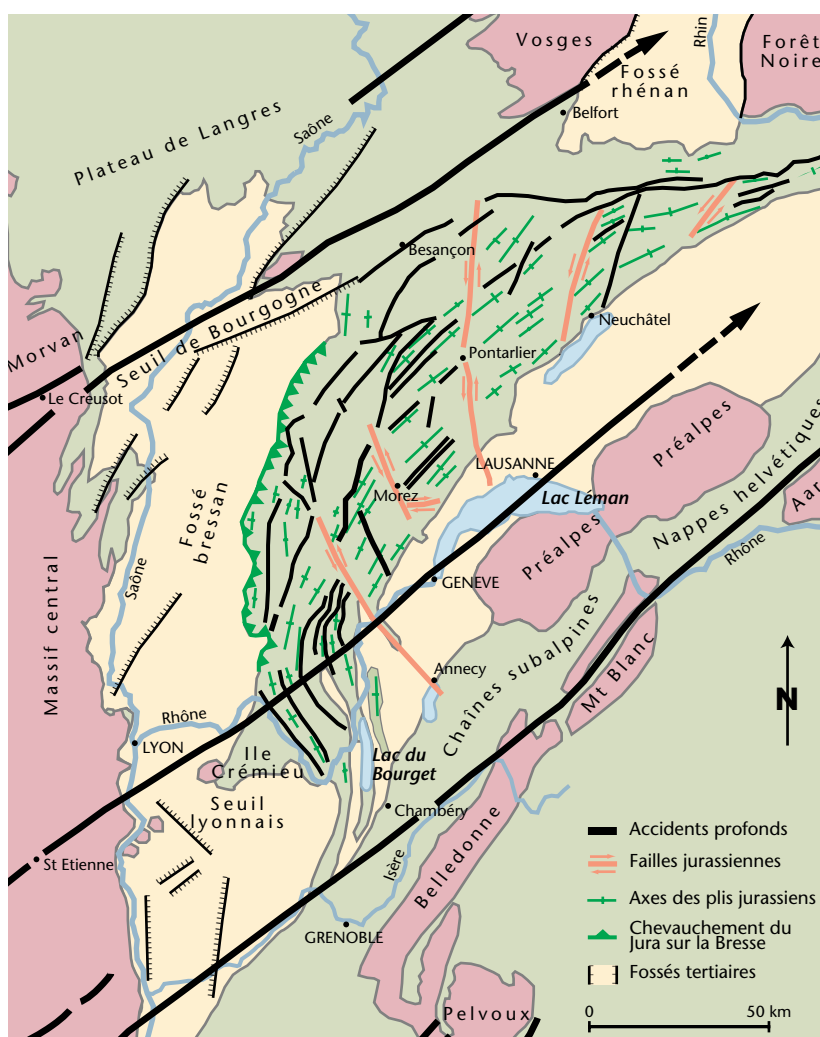


Figure 6.7

Carte tectonique du Jura

6.4.1

Généralités

L'activité sismique d'une région est liée au jeu actuel ou ancien de fractures plus ou moins profondes. La région genevoise est bordée, entre autres, par un grand accident de socle connu sous le nom de faille du Vuache, qui fait partie de la famille des failles jurassiennes, et à laquelle sont associées plusieurs failles annexes (voir figure 6.7).

Les études récentes menées sur l'historique des séismes ayant affecté la région montrent que les épicentres probables se répartissent essentiellement soit sur cette zone de la faille du Vuache orientée Nord 140°, soit sur un accident orienté Nord 50° qui longe le pied du Salève. Cet accident serait en fait un segment d'un accident profond de Saint Etienne jusqu'à Lausanne, reconnu sur les photographies prises par satellite.

En fait, près d'une centaine de séismes ressentis à Genève ou dans les environs ont pu être répertoriés sur une période de quelques 700 ans, soit environ 14 par siècle. Aucun de ces événements n'a entraîné la perte de vies humaines.

La figure 6.8 donne la localisation probable des zones instables et des séismes les plus récents. Du point de vue de l'intensité, selon l'échelle MKS 1964, deux seulement ont atteint l'intensité IX, cinq l'intensité VIII, quatre l'intensité VII.

La magnitude n'a pu être mesurée que sur 10 séismes. On trouve deux fois la magnitude 4,3, une fois 4,2 et sept valeurs comprises entre 3 et 3,8. Il n'y a pas de correspondance entre la magnitude et l'intensité. La première dépend de l'énergie mise en jeu alors que la seconde traduit les effets en surface. Une forte magnitude en profondeur peut se traduire par une intensité plus faible qu'une magnitude plus faible d'un séisme peu profond.

Les failles visibles dans le Jura, et particulièrement la faille de l'Allondon, ne montrent aucune trace d'activité récente. Cette faille de l'Allondon, qui a été très bien observée au passage du tunnel du LEP sous le Jura, n'a pas été observée lorsque le tunnel a recoupé sa trace théorique dans la molasse.

Les normes françaises ¹ définissent quatre zones de séismicité. La zone de Genève se trouve située en Zone 1B – séismicité faible.

Il en ressort que, si la région de Genève n'est pas considérée comme une région très sismique, l'activité dans ce domaine n'y est pas nulle. Toutefois il n'y a pas de trace de tectonique active (ou néotectonique).

1. Règles parasismiques 1969 et annexes

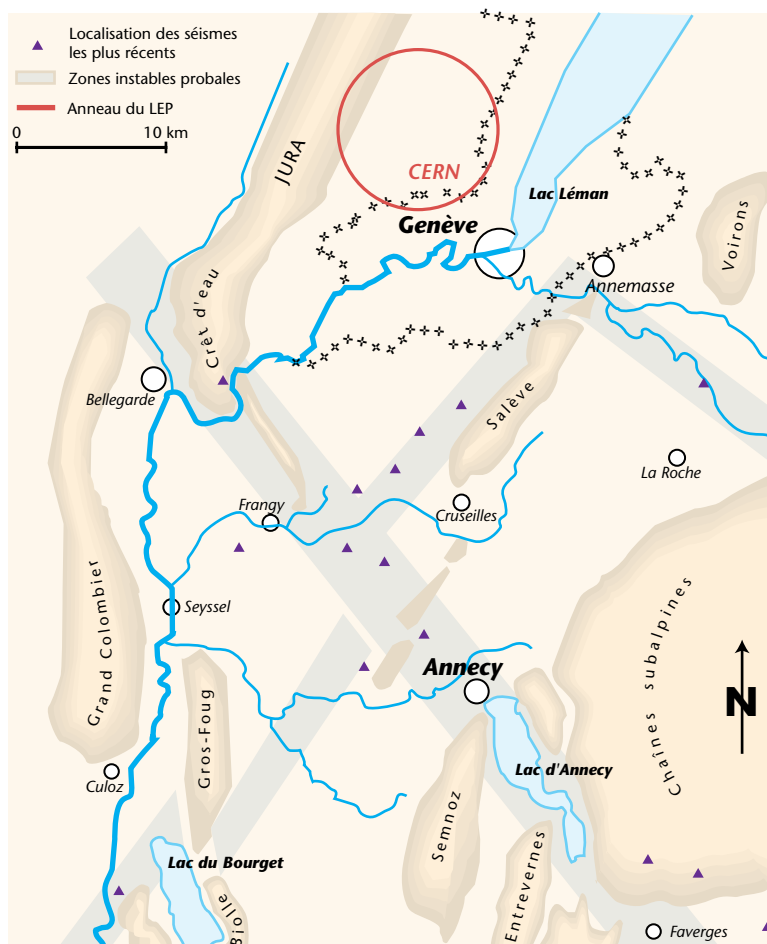


Figure 6.8

Localisation probable des zones instables

6.4.2

Le tremblement de terre du 15 juillet 1996

Le tremblement de terre de magnitude 5,2 du 15 juillet 1996 s'est produit sur le tracé de la faille du Vuache. Son épocentre se trouve à quelques kilomètres au nord d'Annecy.

Il confirme, s'il en était besoin, l'existence d'une zone active orientée Nord 140°, qui correspond à un décrochement. Sa magnitude est l'une des plus fortes qui aient été mesurées dans cette zone depuis qu'on utilise cette méthode pour quantifier l'énergie mise en jeu par un séisme. Les nombreuses répliques qui l'ont suivi se sont toutes produites dans cette zone orientée Nord 140°.

Lors de cet événement, aucune dégradation des faisceaux circulants n'a été mesurée, quels que soient les accélérateurs considérés dans la chaîne des

accélérateurs du CERN (PS, SPS, LEP). De même, aucun élément des différentes machines n'a été déplacé ou endommagé.

Ces observations montrent la très grande stabilité de tous les ouvrages et confirment que le site du LHC ne se trouve pas dans une zone où les répliques des mouvements de la faille du Vuache peuvent se faire sentir.

6.5

Hydrogéologie

Les travaux de construction du LEP ont été l'occasion d'étudier de manière très poussée l'hydrologie du Pays de Gex ¹. Ces études, toujours d'actualité, ont été complétées en 1996, notamment dans la zone de travaux de Cessy (voir Annexe technique n° 3).

6.5.1

Hydrologie du site en général

Le schéma géologique type de la plaine de Genève est décrit plus haut. On peut distinguer deux entités géologiques : d'une part la plaine genevoise constituée des formations molassiques tertiaires, en dépôts subhorizontaux de bancs de marnes et de grès, surmontées par les formations fluvio-glaciaires quaternaires (graviers, sables et argiles) qui entaillent localement le toit de la molasse en profonds sillons ; d'autre part la première chaîne du Jura constituée par un dôme anticlinal, orienté nord-est/sud-ouest et charrié par faille sur le synclinal de la Valserine. Cette chaîne est formée par des terrains (calcaires, marnes et grès) du Trias, du Jurassique et du Crétacé. Elle est affectée de nombreuses failles et phénomènes karstiques (dolines, grottes).

Le contact entre les deux entités, calcaires du Jura et dépôts molassiques, correspond à un paléo-relief dont les irrégularités sont remplies d'argiles rouges d'altération. Ce contact est masqué par les dépôts morainiques de piémont, sauf au droit des ruisseaux où l'érosion permet son observation.

Ces entités géologiques sont le siège d'un aquifère important dans les calcaires du Crétacé et du Jurassique. La base de cette nappe est constituée par le niveau de marnes d'Effingen (Jurassique). Cet aquifère se déverse vers la plaine de Genève, soit sous la forme de sources karstiques au pied du Jura, soit sous la forme de déversements occultes dans les moraines. Aucun nouvel ouvrage du projet LHC n'est situé dans ce secteur. Une série d'aquifères sont également présents dans les dépôts fluvio-glaciaires. On observe généralement une nappe superficielle dans les graviers fluvio-glaciaires, nappe de réserve faible. En revanche, la moraine graveleuse (cailloutis morainiques profonds ou alluvions

1. Les résultats de ces études, menées par le professeur Monjoie de l'université de Liège, avaient été présentés en leur temps dans les Annexes C de l'étude d'impact sur l'environnement du projet LEP.

anciennes) contient, lorsqu'elle existe, une nappe importante souvent captive. La moraine limoneuse et la molasse isolent ces différents aquifères, tant verticalement qu'horizontalement, car les formations perméables n'ont qu'une extension latérale limitée.

Le toit de la molasse présente une série de sillons dont l'influence hydrogéologique est fondamentale ; on distingue d'ouest en est (voir figure 6.9) :

- Le sillon de Sergy qui présente dans sa partie amont, une zone aquifère de 300 m de large et 5 m d'épaisseur, bloquée à l'aval par une zone imperméable et en communication au nord-est avec le sillon de l'Allondon (alimentation possible par celui-ci). La partie aval présente une zone aquifère d'environ 400 m de large et 7 m d'épaisseur (sables fins à grossiers) constituant une nappe semi-captive à captive. Dans cette zone, le drainage est important, il s'agit donc d'une nappe temporaire. La réserve d'eau souterraine dans la partie amont est limitée (700 000 m³), sauf l'hiver lors d'apports de la nappe du Jura. Une potentialité de l'ordre de 1 000 m³ par jour existe dans la zone amont. Aucun nouvel ouvrage n'est situé sur ce sillon.
- Le sillon de l'Allondon qu'on retrouve le long du LEP jusqu'à Naz-dessous. Il y est aquifère sur une forte épaisseur (14 à 20 m de graviers) et comprend une possible digitation, le sillon de la Praslée. Entre Naz-dessous et Avouzon, il est partiellement aquifère. A l'aval d'Avouzon, il présente un aquifère de 600 à 800 m de large et 4 à 8 m d'épaisseur, avec trois rétrécissements (largeur inférieure à 300 m). La réserve peut être estimée à 500 000 m³ susceptible d'assurer un débit d'étiage de 2 500 m³/j. Les captages de Crozet et de Saint Genis-Pouilly (actuellement hors service) près de Pregnin, ont surexploité cette réserve, l'asséchant en été. Aucun ouvrage LHC n'est prévu sur ce sillon.

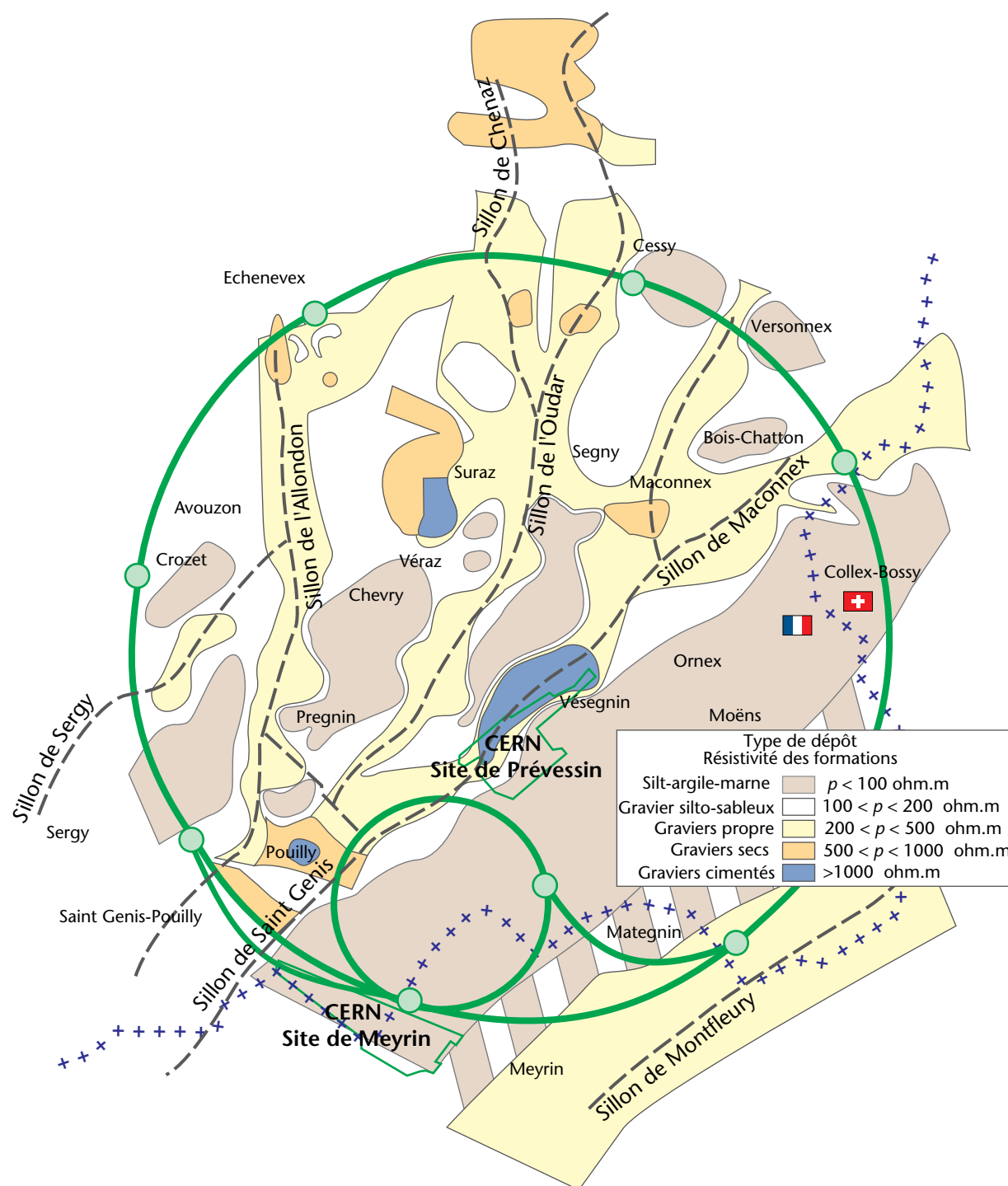


Figure 6.9

Carte hydrogéologique de la zone des ouvrages du CERN

- Le sillon de Chenaz, sillon très large et peu accusé. Au niveau du LEP et en aval, il est aquifère sur 11 à 36 m d'épaisseur. Son prolongement sud est mal connu, il se déverse probablement dans le sillon de l'Oudar au nord de Vèraz où il devient sec. Les formations graveleuses ont des perméabilités de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m/s. Les réserves sont de l'ordre de 4 000 000 m³, alimentées par l'impluvium et l'apport d'eau de la zone de piémont mais également par des pertes du Journans qui, en aval de Gex, recoupent les formations graveleuses du sillon et s'y déversent partiellement.
- Le sillon de l'Oudar qu'on suit : dans la zone de Gex, où il est aquifère sur une épaisseur de 30 m et une largeur de 300 m minimum ; au niveau du LEP, où il est aquifère sur une épaisseur de 15 à 30 m et une largeur de 300 à 400 m (une partie des écoulements de la zone de Gex gagne le sillon de Chenaz mais aussi vers l'ouest le sillon de Saint Genis-Pouilly ou Maconnex) ; entre le LEP et la jonction avec le sillon de Chenaz où on possède peu de données ; en aval de la jonction avec le sillon de Chenaz où il constitue une zone aquifère intéressante de 400 à 700 m de largeur et 15 m d'épaisseur (perméabilité de 10^{-4} à 10^{-3} m/s) ; au nord de Brétigny où on observe un goulot suivi d'une zone moins perméable entre Brétigny et Vèraz ; en aval, où il s'élargit pour rejoindre le sillon de Saint Genis-Pouilly au sud de Pregnin.
Ce sillon n'est pas exploité sauf tout à fait en amont, au Pré-Bataillard près de Gex. Les ouvrages du LHC prévus au Point 5 se situent dans la partie amont de ce sillon, mais nettement en aval de ces captages.
- Le sillon de Saint Genis-Pouilly où on distingue deux parties avec une zone imperméable (au nord de Vésegin sur 1 à 1,5 km) constituée de graviers cimentés qui isolent la partie nord-est aquifère de la partie sud-ouest pratiquement sèche : la partie nord-est peut atteindre 1 500 m de large, sur une épaisseur d'aquifère de 10 m. Au niveau de Bois Chaton, il existe une zone imperméable qui crée la séparation du sillon en deux, avec à l'est le sillon de Maconnex. Cette partie nord-est du sillon de Saint Genis-Pouilly constitue un réservoir important non sollicité.
La partie sud-ouest (en aval de la zone de graviers cimentés) présente un drainage important, de telle sorte que les réserves sont insignifiantes. Les sillons de l'Oudar et de Saint Genis-Pouilly se rejoignent au niveau du SPS ; la partie aval est pratiquement sèche par vidange alors qu'en amont, du fait de la zone cimentée, il y a constitution de réserves de 4 000 000 m³ non sollicitées. La zone aval a été explorée dans le cadre de l'étude relative au tunnel de transfert TI 2 prévu dans le projet LHC.
- Le sillon de Maconnex, digitation du sillon de Saint Genis-Pouilly qui vient de l'est de Bois Chaton. Les ouvrages du projet LHC au droit du Point 6 se situent dans la partie amont de ce sillon. Aucun ouvrage LHC n'est situé sur le tracé de ce sillon.
- Le sillon de Montfleury, qui passe sous l'aéroport de Genève-Cointrin et est limité au nord-ouest par la zone imperméable (Ornex-Vésegin). La profondeur du sillon peut atteindre 100 à 150 m. Les limites sud et est sont mal connues. Aucun ouvrage du projet LHC n'est situé sur ce sillon.

6.5.2

Hydrologie autour des ouvrages du projet LHC

Les nombreux sondages effectués lors de la construction du SPS puis du LEP ont permis de bien connaître les 100 km² dans lesquels s'inscrit le tunnel LEP/LHC. Ils ont été complétés par 41 sondages supplémentaires. Les emplacements de ces sondages (ou groupes de sondages) sont présentés dans la figure 6.10. Seuls les points où des travaux sont prévus sont décrits ci-dessous.

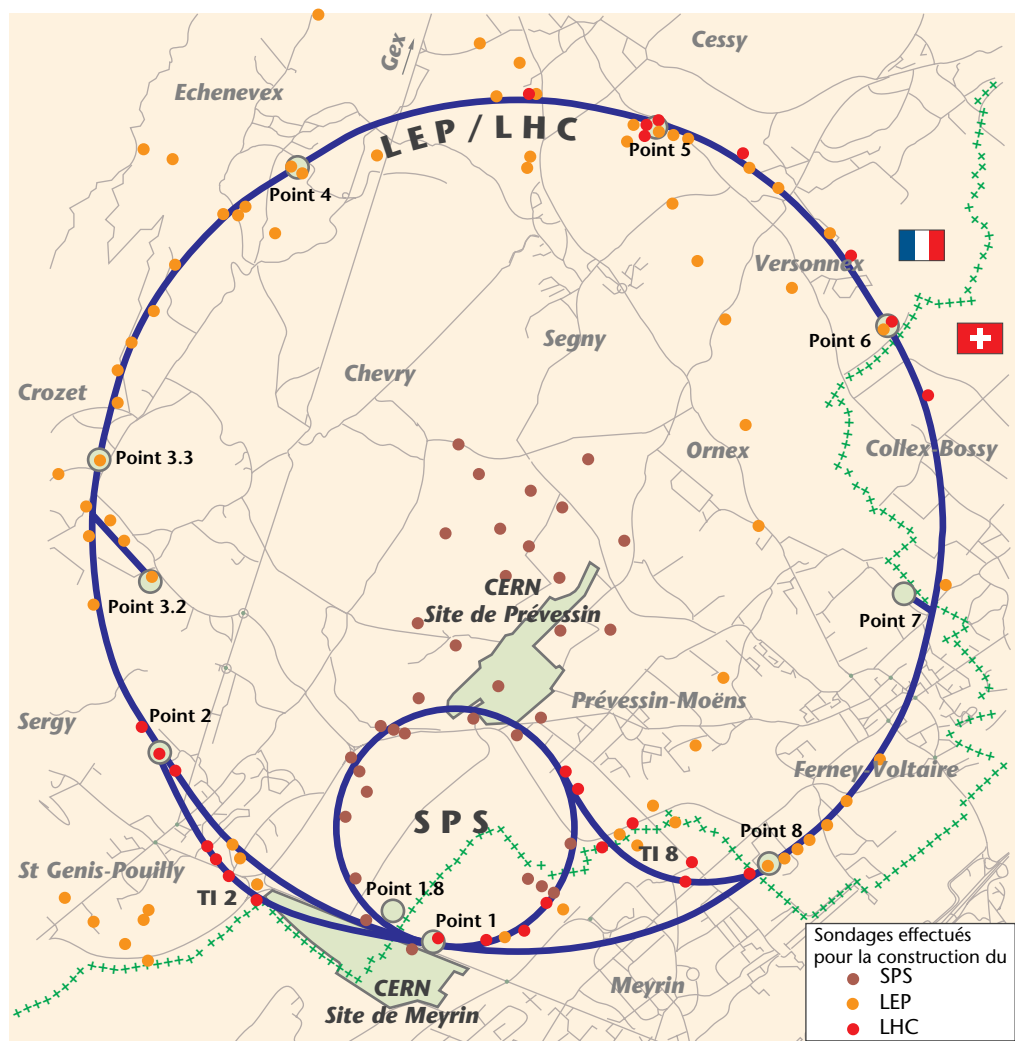


Figure 6.10

Sondages (ou groupes de sondages) effectués depuis 1970

6.5.2.1

Au Point 1

La géologie du secteur (voir Annexe technique n° 4, "Reconnaitances géologiques et géotechniques pour le LHC") est caractérisée par la remontée de la molasse tertiaire d'âge chattien (crête molassique d'Ornex-Vésegny) entre les sillons de Saint Genis-Pouilly au nord-ouest et de Montfleury au sud-est. La

molasse se situe à une faible profondeur, inférieure à 10 m à certains endroits. Au droit du Point 1, la molasse est recouverte de 3,6 à 9,7 m d'une moraine limoneuse. D'un point de vue hydrogéologique, la moraine limoneuse est imperméable et ne présente pas d'aquifère.

6.5.2.2

Pour le tunnel de transfert TI 2

Le cadre géologique du tunnel TI 2 (voir figure 4.2) est caractérisé par la présence de deux sillons : le sillon de Saint Genis-Pouilly et la terminaison sud du sillon de l'Allondon. Du sud-est au nord-ouest, on observe le long du profil du TI 2 :

- l'approfondissement du toit de la molasse entre la crête molassique d'Ornex-Vésegrin (qui sépare les sillons de Saint Genis-Pouilly et de Montfleury) et le sillon de Saint Genis-Pouilly, celui-ci atteignant la cote moyenne de + 396 m à + 400 m et contenant une moraine graveleuse d'une épaisseur maximale proche de 6 m surmontée de limons graveleux imperméables
- une remontée du toit de la molasse entre le sillon de Saint Genis-Pouilly et la terminaison du sillon de l'Allondon
- le bord oriental du sillon de l'Allondon, contenant une moraine graveleuse.

D'un point de vue hydrogéologique, les sillons de Saint Genis-Pouilly et de l'Allondon sont le siège d'aquifères.

Au droit du sillon de Saint Genis-Pouilly, cinq sondages ont permis de déterminer que le toit de la molasse est plus bas que prévu et que la moraine graveleuse est le siège d'un aquifère dont le niveau piézométrique s'établit à la cote approximative de + 404 m.

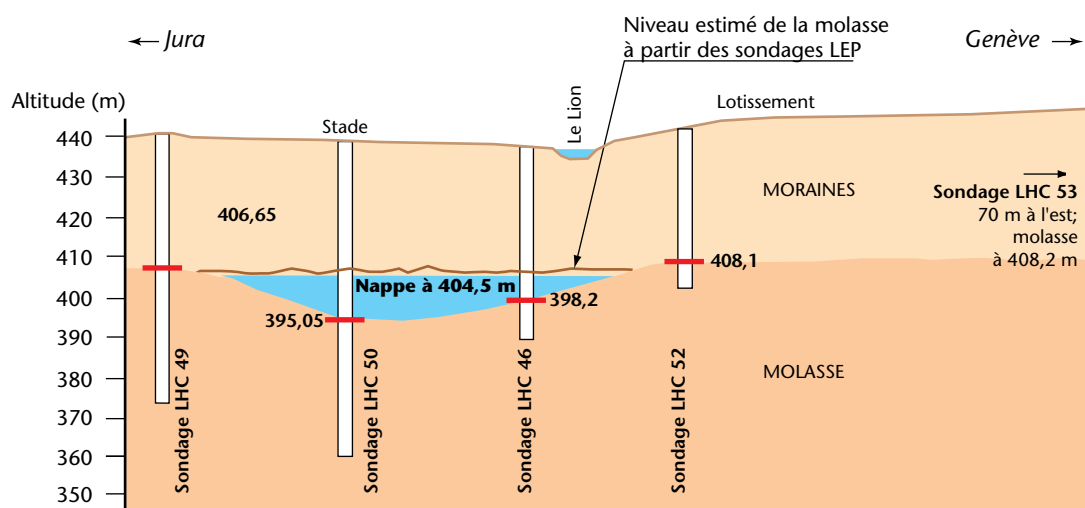


Figure 6.11

Sondages hydrogéologiques pour le tunnel TI 2

Au droit du sillon de l'Allondon, les dépôts fluvio-glaciaires sont le siège d'une nappe temporaire subaffleurante tandis que la moraine graveleuse (d'une épaisseur de 1 à 3 m) est le siège d'une nappe artésienne.

Un essai de pompage, avec un débit de l'ordre de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, a été réalisé sur le forage SLHC 46 en enregistrant, en parallèle, les fluctuations piézométriques au SLHC 50. L'interprétation des essais donne des perméabilités initiales de $2,5$ à $3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, diminuant en cours de pompage, pour atteindre des valeurs de 4 à $6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. On constate d'autre part que l'on n'atteint pas la stabilisation et que la remontée est lente. Cela semble indiquer une vidange de l'aquifère malgré le débit de pompage limité. Les réserves de la nappe sont très faibles, ce qui est logique, compte tenu de la bonne perméabilité de la moraine graveleuse testée et de sa situation immédiatement en aval d'un secteur cimenté. Un prélèvement d'eau pour analyse chimique montre une eau bactériologiquement non potable. On peut conclure que l'aquifère dans cette zone n'est pas intéressant, tant du point de vue qualitatif que quantitatif.

6.5.2.3

Au Point 5

Le cadre géologique du Point 5 est caractérisé par le passage du sillon de l'Oudar. Le sillon de l'Oudar est une profonde entaille dans le toit de la molasse occupée par une série de dépôts morainiques.

Douze sondages ont mis en évidence la présence de deux aquifères. Le premier (nappe supérieure) siège dans la faible épaisseur de graviers fluvio-glaciaires. Cette nappe est d'étendue limitée. Le second (nappe inférieure) se situe dans les cailloutis morainiques profonds. Cette nappe est très étendue.

Les deux nappes sont isolées par les horizons limoneux ou limono-graveleux imperméables. Des mesures lors des forages (micro-moulinet) ou par essais de pompage ont permis d'évaluer les perméabilités (voir Annexe technique n° 3, "Annexes hydrologiques et hydrogéologiques" et Annexe technique n° 4, "Reconnaitances géologiques et géotechniques pour le LHC").

Si on établit une carte piézométrique des deux nappes, on observe que :

- au niveau de la nappe supérieure, les écoulements sont sensiblement orientés du nord vers le sud, avec un rapprochement des isopièzes en aval des sondages SLHC 35, 34 et 39, traduisant la présence d'une frontière relativement imperméable ;
- au niveau de la nappe inférieure, les écoulements sont sensiblement orientés nord-est/sud-ouest.

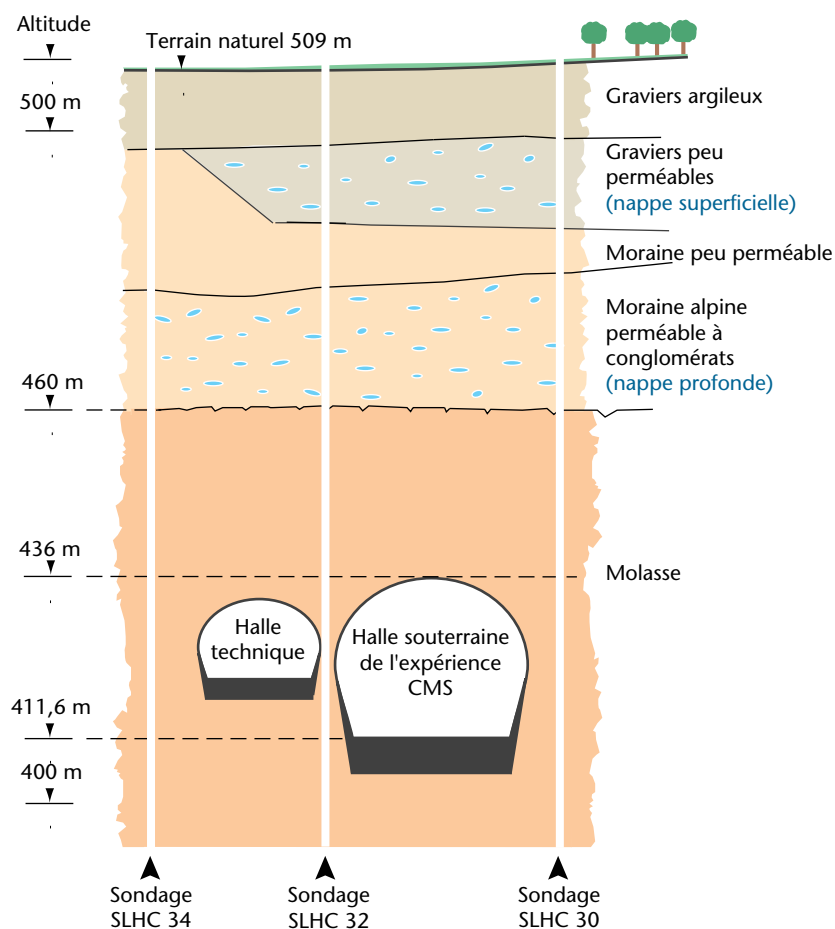


Figure 6.12

Coupe hydrogéologique au niveau du Point 5

Les essais de traçage se sont déroulés en deux phases. Lors de chacune des deux phases de traçage, des essais de pompage ont été réalisés préalablement aux injections des traceurs, dans les puits de récupération. Les valeurs de débit prises en compte sont respectivement de $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour la nappe supérieure et $11,1 \text{ m}^3/\text{h}$ pour la nappe inférieure.

La calibration a été faite sur les niveaux stabilisés après une journée de pompage. Elle n'est pas excellente pour la nappe supérieure car, celle-ci étant limitée latéralement par des zones moins perméables sauf au nord, on assiste à une vidange assez uniforme de l'aquifère. Il est difficile, dans ces conditions, d'en déduire des caractéristiques hydrodynamiques précises. Pour la nappe inférieure, en revanche, l'écart maximum obtenu au droit de SLHC 35 est de 3 cm.

Sur la base des paramètres hydrodynamiques obtenus, on a simulé l'influence des deux nouveaux puits (PM 54 et PX 56). On observe :

- une remontée maximum de 6 cm en amont et un rabattement maximum de 7 cm en aval dans la nappe supérieure
- une remontée maximum de 3 cm en amont et un rabattement maximum de 3 cm en aval dans la nappe inférieure.

Les essais de traçage ont été réalisés dans les deux nappes entre différents piézomètres et puits de reprise pour déterminer les vitesses réelles effectives de l'eau, la porosité efficace, et les paramètres de diffusion et de dispersion. La calibration des courbes de restitution a été effectuée, avec une méthode analytique puis un modèle tridimensionnel d'écoulement et de transport de colorant miscible. Elle a permis une estimation précise de la porosité efficace sur chaque trajet testé par essai de traçage. Dans la zone des ouvrages, les ordres de grandeur sont de 18 cm/h pour la nappe supérieure et de 36 cm/h pour la nappe inférieure. Il faut noter que dans la nappe supérieure l'épaisseur de l'aquifère diminue au sud de la zone des ouvrages, ce qui provoque une augmentation des vitesses dans ce secteur ; dans la nappe inférieure, des axes de circulation préférentiels sont bien marqués.

6.5.2.4

Au Point 6

La géologie du Point 6 est caractérisée par le passage du sillon de Maconnex. De part et d'autre du Point 6, on observe une remontée du toit de la molasse délimitant le sillon de Maconnex occupé par une moraine graveleuse (voir figure 6.13). Deux sondages ont été réalisés au droit des salles des absorbeurs de faisceaux. La cote du toit de la molasse varie entre + 442 m au centre du sillon de Maconnex et + 458 m au niveau des remontées. D'un point de vue hydrogéologique, la moraine graveleuse composant le sillon de Maconnex est le siège d'un aquifère (perméabilité de $1,3$ à $1,7 \times 10^{-3}$ m/s). Aucun ouvrage LHC ne traverse ce sillon.

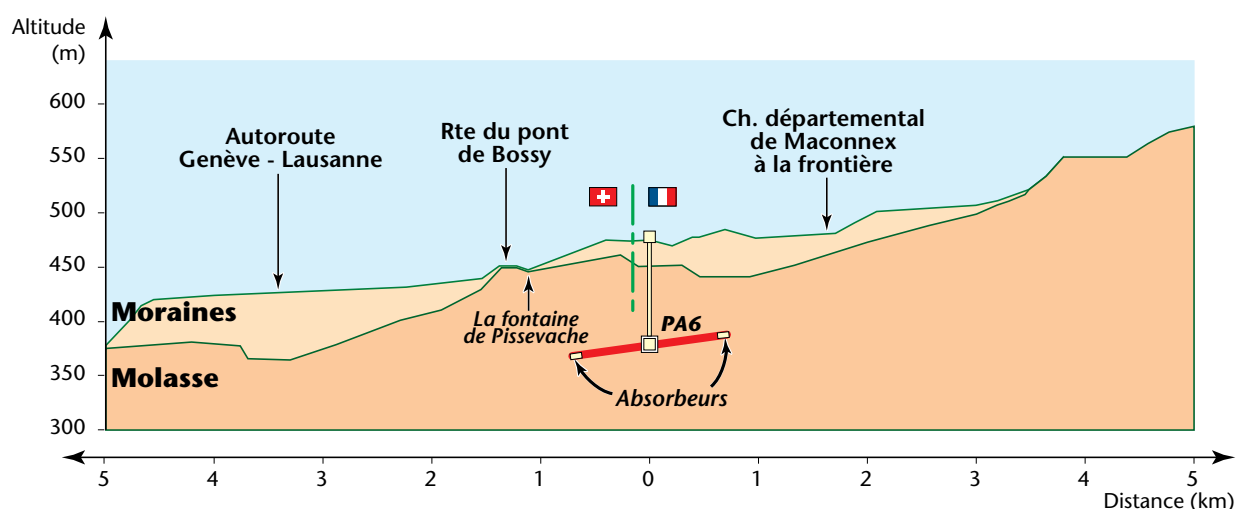


Figure 6.13

Profil géologique le long de l'axe des absorbeurs de faisceaux

6.5.2.5

Pour le tunnel de transfert TI 8

Le cadre géologique du tunnel TI 8 (voir figure 4.5) est caractérisé par le passage du sillon de Montfleury, dont la connaissance a été affinée par quatre sondages complémentaires. D'ouest en est, on distingue le long du tracé du tunnel TI 8 :

- la remontée du toit de la molasse (crête molassique d'Ornex-Vésegnin) au niveau de la jonction du TI 8 et du SPS ; cette remontée constitue la séparation entre le sillon de Saint Genis-Pouilly et le sillon de Montfleury
- la descente du toit de la molasse en direction du sillon de Montfleury
- le très profond sillon de Montfleury au niveau de la jonction du TI 8 et du LEP ; la profondeur du sillon y atteint 80 m, dont 30 à 40 m sont constitués par une moraine graveleuse.

D'un point de vue hydrogéologique, le sillon de Montfleury est le siège d'un important aquifère dans sa partie graveleuse, avec un niveau piézométrique proche de 385 m. A l'ouest, la molasse imperméable est recouverte d'une moraine limoneuse également imperméable. Aucun ouvrage LHC ne traverse ce sillon.

6.6

Les eaux

L'eau est un élément primordial à prendre en considération dans la préparation et la réalisation d'un projet souterrain. En effet, il est indispensable d'éviter l'impact des ouvrages sur les ressources en eau des populations locales et de protéger ces mêmes ouvrages contre les effets de l'eau.

6.6.1

Les études hydrologiques effectuées pour le projet LEP

Au début des années 1980, le projet LEP avait permis de compléter et de préciser la configuration, les niveaux et les débits des nappes phréatiques du Pays de Gex et d'établir le bilan hydraulique complet de tout le bassin versant concerné par le tunnel de l'accélérateur. Les études entreprises et publiées dans l'étude d'impact du LEP couvraient :

- la détermination des limites du bassin hydrogéologique
- l'étude hydrométéorologique de ce bassin (précipitations, températures, hygrométrie, ensoleillement, évapotranspiration, variations du stock d'humidité du sol ...)
- l'étude des débits des cours d'eau irriguant le bassin (mesure en continu des niveaux des rivières, établissement des courbes de débits, traçage des hydrogrammes correspondants)

- le recensement de tous les points d'eau et la mesure périodique des débits et niveaux pour les plus significatifs
- l'analyse chimique des sources des cours d'eau et de certaines résurgences caractéristiques
- le calcul des bilans des réserves d'eaux souterraines.

Un certain nombre de mesures des paramètres précités se sont poursuivies depuis :

- débit des rivières Allondon et Lion (mesures journalières)
- niveau du sondage SPM 6 à Crozet (mesures journalières)
- pluviométrie aux Points 4 et 8.

Ces mesures ont ainsi contribué à une meilleure connaissance de l'hydrologie du Pays de Gex, connaissance utile aux hydrogéologues, mais aussi aux collectivités locales et aux administrations dans le cadre de la recherche de ressources nouvelles pour l'alimentation en eau des populations locales dans le contexte d'un habitat en expansion.

6.6.2

Les ressources en eau dans le Pays de Gex

L'alimentation en eau potable du Pays de Gex est assurée exclusivement à partir des eaux souterraines issues de trois types d'aquifères :

- les eaux du karst du massif calcaire du Jura, à l'origine de nombreuses sources de piémont mais aussi dans le secteur montagneux du Pays de Gex,
- les eaux de la nappe des alluvions anciennes fluvio-glaciaires, correspondant à la zone de plaine du Pays de Gex,
- les eaux des alluvions modernes du Rhône.

Il y a 53 captages dans le Pays de Gex ; chacun d'entre eux est doté de trois périmètres de protection :

- immédiat, le plus souvent une parcelle au milieu de laquelle se trouve le captage, clôturée et souvent plantée d'herbe,
- rapproché
- éloigné.

Les dimensions et configuration de ces deux derniers périmètres dépendent des caractéristiques du relief et de l'écoulement hydro-géologique. Les zones de protection sont présentées dans la carte présentant les principales zones d'occupation des sols (voir figure 6.35, page 226).

Les captages les plus importants sont ceux de Pré-Bataillard, Chenaz, La Praslée, Greny, Pougny et des Révines.

Deux exploitations industrielles de sources d'eau minérale sont actuellement en projet sur les territoires des communes de Divonne-les-Bains et Mijoux. Ces deux projets tirent un excellent parti de l'état actuel de la protection des sites et de l'environnement dans leur secteur, en particulier de la création de la réserve naturelle qui touche directement leurs territoires respectifs.

La collecte et le traitement des eaux usées sont organisés selon les deux bassins versants principaux, celui de la Versoix pour la partie nord du Pays de Gex, et celui du Rhône pour la partie sud.

6.6.3

L'alimentation en eau du CERN

Durant les 10 dernières années, la consommation annuelle d'eau brute pour la réfrigération est restée stable à un niveau d'environ 20 millions de m³. Le CERN est alimenté en eau brute pour trois quarts à partir du lac Léman par la station de pompage du Vengeron (Suisse) et pour un quart par la station de pompage de Peney (Suisse). Cette dernière pompe l'eau dans une nappe aquifère située à proximité du Rhône en amont du barrage de Verbois. Le tableau 6.1 montre la répartition entre les deux stations pour 1995.

Tableau 6.1

Consommation d'eau brute au CERN en 1995

Station du Vengeron (m ³)	Station de Peney (m ³)	Total (m ³)
15 993 388	4 763 921	20 757 309

Les Services industriels de Genève (SIG) comptabilisent les quantités d'eaux utilisées par le CERN et contrôlent leur qualité. Ils transmettent régulièrement au CERN les résultats des analyses effectuées au niveau des stations de pompage du Vengeron et de Peney. Ces résultats sont reçus, analysés et archivés par le groupe ST-CV.

L'organisation actuelle de la distribution d'eau brute au CERN est représentée dans la figure 2.18, page 44. Cette eau brute est utilisée comme eau de réfrigération des composants des grands accélérateurs (PS, SPS et LEP).

Les sites du LEP sont alimentés en eau potable depuis les réseaux communaux les plus proches. Le tableau 6.1 donne la quantité consommée en 1995 pour les différents points.

Les raccordements aux réseaux d'eau du Pays de Gex sont faits suivant le plan EP5 2000 03 de février 1981, révisé en novembre 1995 avec le concours des sociétés fermières responsables de ces réseaux ¹. Ce plan est tenu à jour et archivé par le groupe ST-CE du CERN.

1. Il s'agit de la CISE, basée à Saint Genis-Pouilly, et de la SDEI, basée à Ornex.

Tableau 6.2

Consommation d'eau potable sur les sites du LEP en 1995

Site	Consommation (m ³)
Point 2	12 492
Point 3	101
Point 4	6 918
Point 5	0
Point 6	13 367
Point 7	940
Point 8	21 713

6.6.4

Les eaux rejetées

Les eaux rejetées sont constituées des eaux de réfrigération, des eaux pluviales, des eaux de drainage et des eaux usées. L'ensemble des mesures de la qualité des eaux effectuées depuis la fin des années soixante-dix sont représentatives de l'état initial pour le LHC.

Lors de leur emploi au CERN, les eaux de réfrigération ne subissent aucune altération. Les eaux pluviales représentent l'ensemble des eaux de précipitation recueillies aussi bien sur les toitures que sur les parkings. Les deux principaux points de rejet des eaux de réfrigération et des eaux pluviales sont le Nant d'Avril en Suisse et le Lion en France. En moyenne, 85% de ces eaux sont rejetées dans le Nant d'Avril et 15% dans le Lion.

Les rejets dans le Nant d'Avril correspondent aux eaux de réfrigération du PS, du SPS et du LEP, ainsi qu'aux deux tiers des eaux recueillies en surface sur le site de Meyrin. Les rejets dans le Lion correspondent aux eaux de surface du site de Prévessin-Moëns et à un tiers de celles du site de Meyrin.

Les eaux pluviales collectées sur les sites des points d'accès de la machine LEP sont rejetées localement : dans l'Allondon pour les Points d'accès 2 et 3, dans la Varfeuille pour le Point 4, dans l'Oudar pour le Point 5, dans le Nant de la Rabatière pour le Point 6, dans le Nant Marquet pour le Point 7 et dans le Nant Gobé pour le Point 8.

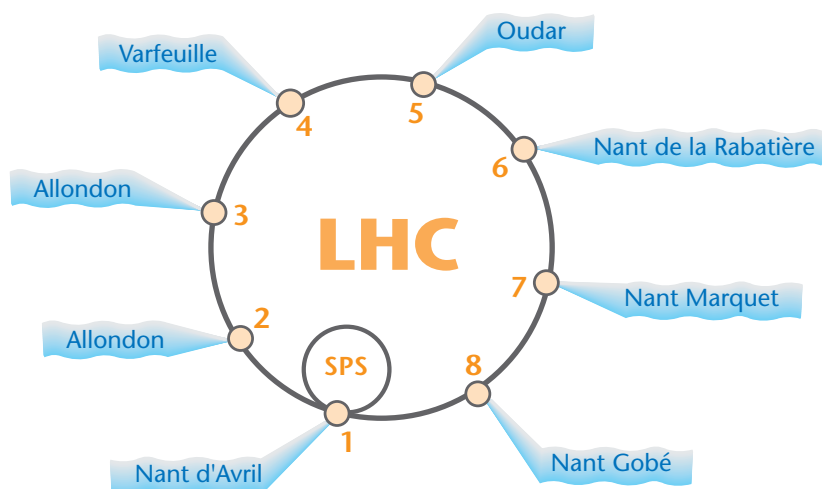


Figure 6.14

Points de rejet des eaux pluviales et de drainage des sites LEP

Les eaux de drainage du tunnel ainsi que la faible quantité d'eau brute utilisée pour le refroidissement de l'électronique dans les alvéoles électriques sont, comme les eaux pluviales, rejetées dans les rivières les plus proches des sites. Le tableau 6.3 donne le débit moyen des rejets d'eaux de drainage.

Tableau 6.3

Eaux de drainage : points de rejet et débits

Site	Cours d'eau	Débit moyen (l/s)
Point 1	Nant d'Avril	0,9
Point 2	Allondon	1,6
Point 3	Allondon	22
Point 4	Varfeuille	1,7
Point 5	Oudar	1,9
Point 6	Nant de la Rabatière	2,9
Point 7	Nant Marquet	0,9
Point 8	Nant Gobé	3,7

Les eaux usées sont collectées et envoyées aux stations d'épuration suisses ou françaises proches des installations du CERN. Les eaux usées d'une partie du site

de Meyrin, celles du site de Prévessin-Moëns et celles des Points 2, 3, 3.3, 4 et 5 sont dirigées vers la station d'épuration de Saint Genis-Pouilly. La seconde partie des eaux usées du site de Meyrin est envoyée sur la station d'épuration de Peney. Les eaux usées du Point 6 du LEP sont collectées vers la station d'épuration de Sauverny. Celles des Points 7 et 8 du LEP sont dirigées vers la station d'épuration de Ferney-Voltaire.

6.6.5

Contrôle de la qualité des rejets d'eaux

La qualité des eaux s'écoulant depuis les sites du CERN vers les rivières environnantes n'a subi au cours des dernières années aucune influence perceptible du fait de l'exploitation des accélérateurs, hormis une augmentation de température ponctuelle dans le Nant d'Avril et le Lion sans dommage pour ces cours d'eau.

6.6.5.1

Contrôles physico-chimique et chimique : eaux de réfrigération

La réglementation française ¹ recommande que la température des rejets soit inférieure à 30°C et que le pH soit compris entre 5,5 et 8,5. La quantité d'hydrocarbures dans l'eau doit être inférieure à 15 mg/l.

Les eaux de réfrigération et les eaux pluviales rejetées dans le Nant d'Avril ou le Lion sont soumises à un contrôle en continu de leur température et de leur pH. Ces contrôles sont effectués par six stations de mesure. Trois stations surveillent la qualité des eaux rejetées vers le Nant d'Avril ; trois autres stations surveillent la qualité des eaux rejetées dans le Lion.

Les valeurs de pH et de température sont transmises en continu à la salle de contrôle technique (TCR). Le seuil de tolérance pour la valeur du pH des eaux rejetées est fixé entre 6,5 et 8,5. En deçà ou au-delà de ces valeurs, les opérateurs de TCR ont la consigne permanente d'avertir immédiatement le service de sécurité qui prend alors les mesures appropriées.

En outre, le Lion et le Nant d'Avril font l'objet d'une surveillance en continu. Les points critiques sont régulièrement inspectés, notamment les endroits où se déversent les eaux du CERN et les endroits où existent des risques de pollution par d'autres sources. A certains endroits, on effectue des mesures ponctuelles du pH, de la température, de l'oxygène dissous, de la conductivité et de la turbidité et des mesures de conductivité et de turbidimétrie sont effectuées par prise d'échantillons dans les rivières avant et après les sorties d'effluents. Ces mesures sont complétées par un contrôle visuel de l'état de la rivière.

1. Arrêté du premier mars 1993 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux rejets de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation, NOR : ENV P 93 20125 A (J.O. du 28 mars 1993), annulé le 21 octobre 1996 (arrêt du Conseil d'Etat).

6.6.5.2**Contrôles physico-chimique et chimique : eaux de drainage**

Les eaux de drainage rejetées sont de bonne qualité. Celles du Point 6 ont été utilisées pour aménager une "zone humide", où une vie aquatique s'est développée, attirant de nombreux oiseaux. En amont de chaque point de rejet des eaux pluviales ou des eaux de drainage se trouve un séparateur permettant de retenir des hydrocarbures éventuels.

Au Point 8, où la molasse présente effectivement des poches d'hydrocarbures naturels, les eaux de drainage passent à travers un séparateur à trois étages de 110 m². Des prélèvements sont effectués chaque mois et analysés par le Département genevois de l'intérieur, de l'environnement et des affaires régionales. Le taux de présence d'hydrocarbures à la sortie du séparateur fluctue autour de 0,2 mg/l, soit 50 fois moins que les tolérances légales.

Les rejets d'eau de drainage des Points 2 à 8 ont également été échantillonnés de manière à fixer l'état initial pour le LHC (voir Annexe technique n° 16, "Eaux de drainage des puits d'accès : qualité des eaux et impact des rejets sur les cours d'eau récepteurs"). D'une manière générale, il ressort de ces mesures que la qualité des eaux rejetées est bonne.

Au Point 2, le débit du rejet est faible, de l'ordre de 1% du récepteur et la qualité biologique de l'Allondon est bonne aussi bien en amont qu'en aval du rejet.

Au Point 3, Les caractéristiques du rejet sont comparables à celles du Point 2 (même cours d'eau plus en aval) et son débit reste faible (environ 4% du récepteur).

Au Point 4, la qualité biologique de la Varfeuille est médiocre à mauvaise aussi bien en amont qu'en aval du rejet, dont la qualité est meilleure que celle du récepteur. Le débit de ce rejet représente environ 10% de celui de la Varfeuille.

Au Point 5, le rejet s'écoule sur la rive droite de l'Oudar. Malgré la présence de macrodéchets d'origine domestique, la qualité de l'Oudar est bonne aussi bien en amont qu'en aval du rejet.

Le rejet du Point 6 s'écoule par le Nant de la Rabatière vers la Versoix en transitant par un étang créé par le CERN (biotope). Le débit moyen est de l'ordre de 3 l/s. Par rapport au récepteur, la Versoix, le débit du rejet est insignifiant.

Le rejet du puits d'accès n° 7 s'écoule dans le nant Marquet en direction du Gobé. Il s'agit d'un rejet intermittent d'un débit important par rapport au récepteur (supérieur à 50%). Le récepteur en amont du rejet est composé par des eaux de ruissellement de la zone de Ferney-Voltaire. En amont du rejet, la macrofaune présente, peu abondante, est semblable à celle observée en aval.

Les eaux de drainage rejetées au Point 8 aboutissent dans le Gobé. Le débit moyen est d'environ 4l/s. La nature géologique des terrains entraîne une contamination naturelle aux hydrocarbures qui est traitée dans une station à la

sortie du pompage (écrémage et produits absorbants). La pollution organique du récepteur est très importante en amont du rejet, dont le débit représente environ 10% de celui du Nant Gobé.

Les investigations effectuées par l'échantillonnage des rejets pour tous ces points comprennent des mesures *in situ* (O₂, température, conductivité) et des analyses des paramètres physico-chimiques courants. Des observations de la macrofaune benthique ont été réalisées à titre complémentaire afin d'évaluer la qualité biologique du récepteur en amont et en aval du point de rejet.

De manière synthétique pour chaque paramètre, les résultats sont les suivants :

- Température, oxygène, pH, conductivité, MES : rien à signaler, eau non polluée (les valeurs élevées du pH et de la conductivité sont dues à la forte minéralisation des eaux)
- Azote ammoniacal : les concentrations définissent une eau non polluée pour le Point 6, faiblement polluée pour les Points 2, 3, 4, 5, 7, 8.
- Nitrites et nitrates : eau non polluée pour toutes les stations
- Phosphates : eau non polluée pour toutes les stations
- Demande chimique en oxygène : eau pure pour toutes les stations (concentration inférieure à la limite de détection)
- Chlorures : eau non polluée pour toutes les stations
- Dureté : eaux dures à très dures pour toutes les stations (géologie)
- Sulfates : concentrations nettement inférieures à la norme ODEU de rejet dans les eaux courantes (100 mg/l) bien que relativement élevées pour les Points 2, 4, 6, 7 et 8.

Les normes utilisées pour l'interprétation des résultats sont celles de la DDAF (France). Ces normes définissent 5 catégories de qualité de l'eau. Dans le cas des eaux des PA du CERN, les valeurs se situent toujours dans les catégories 1A ("excellent, situation normale") et 1B ("bonne, pollution modérée").

Concernant les analyses du chlorures et de la dureté, les références pour l'interprétation sont les catégories définies par Arrignon (1976). Enfin, concernant les sulfates, l'ODEU (Ordonnance sur le déversement des eaux usées, Suisse) a été prise comme référence.

Une campagne de mesure réalisée par les SIG le 29 janvier 1997 sur les Points 1, 2, 3, 4, 6, 7 et 8 confirme les remarques présentées ci-dessus. A noter que ces analyses indiquent en plus une bonne qualité bactériologique (pas de contamination fécale) et des concentrations normales pour les métaux.

6.6.5.3

Contrôle radiologique des eaux

Trois stations de mesure situées sur les collecteurs de sortie du site de Meyrin, ainsi que deux stations situées sur les collecteurs de sortie du site de Prévessin-

Moëns et une station située à la sortie des eaux du LEP au Point 1 permettent de mesurer en continu l'activité gamma des eaux rejetées vers le Nant d'Avril et le Lion. A ces mêmes points, un échantillonneur automatique prélève en continu des échantillons qui sont collectés une fois par mois pour l'analyse de l'activité bêta totale et de la teneur en tritium.

Une fois par an, des échantillons sont prélevés dans l'Allondon, le Lion, la Versoix et le Nant d'Avril, ainsi que dans les ruisseaux qui sont situés à proximité des Points 1 à 8 du LEP. Sur ces échantillons sont mesurées les activités gamma totales et la teneur en tritium.

La radioactivité des précipitations est contrôlée une fois par mois par prise d'échantillons sur les toits des bâtiments 24 et 865.

Les résultats de l'ensemble de ces mesures sont publiés dans les rapports trimestriels du groupe Radioprotection du CERN ¹. Les valeurs relevées sont à la limite du mesurable.

6.7

La qualité de l'air

La qualité de l'air au voisinage du CERN est affectée par les activités des industries, de la population (chauffage en particulier) et par la circulation routière dans la région. La qualité de l'air autour des sites est régulièrement contrôlée. Les paramètres pris en compte sont les oxydes d'azote et l'ozone, seules substances potentiellement produites.

L'ensemble des mesures de la qualité de l'air effectuées depuis 1986 sont représentatives de l'état initial pour le LHC. Ces mesures n'ont détecté aucun impact des installations du CERN.

6.7.1

Qualité de l'air rejeté par le système de ventilation

Le NO et le NO₂ sont rejetés dans l'atmosphère par des sources naturelles et artificielles selon des rythmes continus et saisonniers. La figure 6.15 montre schématiquement la façon dont l'azote atmosphérique est naturellement recyclé par des processus biologiques et atmosphériques.

La production naturelle d'ozone est due principalement à l'effet de la lumière du soleil sur l'air et les concentrations d'ozone augmentent considérablement en été. Les oxydes d'azote résultent de combustions, par exemple dans les moteurs à combustion interne et les centrales thermiques. Les concentrations en oxydes d'azote s'élèvent en hiver, avec des pointes le matin et en fin d'après-midi, lorsque le trafic automobile est à son maximum. Les oxydes d'azote sont

1. Par exemple dans le rapport CERN/TIS/RP/97-03 pour l'année 1996.

également produits naturellement dans l'atmosphère par des réactions de l'azote avec l'oxygène de l'air déclenchées par exemple par la foudre.

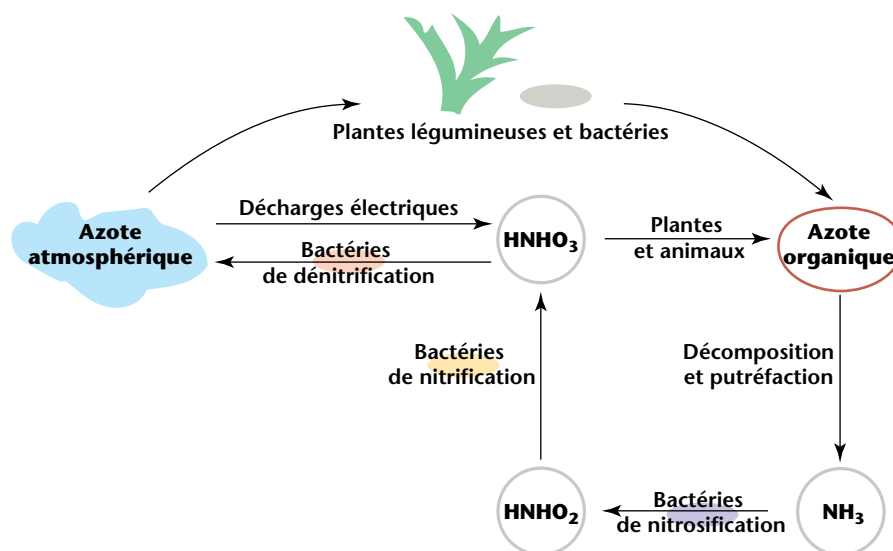


Figure 6.15

Le cycle azotique

Le NO présent dans l'atmosphère s'oxyde généralement très rapidement, en particulier en présence d'un oxydant aussi puissant que l'ozone, pour former du NO₂. En présence de vapeur d'eau, le NO₂ forme de l'acide nitrique, qui est ensuite extrait de l'atmosphère par la pluie.

On s'intéresse ici aux oxydes d'azote formés par radiolyse de l'air dans le tunnel du LEP. Toutefois, le trafic automobile sur les sites du CERN et à leur voisinage en produit des quantités bien plus grandes, de même que la centrale thermique du CERN en hiver. En 1995, cette centrale a été convertie à une alimentation propre par du gaz naturel au lieu de fioul lourd.

Les quantités d'ozone (O₃) et d'oxydes d'azote (NO et NO₂) sont les paramètres pertinents que mesurent les postes de surveillance de la qualité de l'air. En traversant les blindages en plomb des enceintes à vide dans le tunnel du LEP, le rayonnement synchrotron catalyse la production d'ozone et d'oxydes d'azote. Les photons dont l'énergie est supérieure à quelques électronvolts excitent des molécules d'oxygène qui peuvent alors réagir avec d'autres molécules d'oxygène pour former de l'ozone. Les molécules d'oxygène excitées peuvent également réagir avec l'azote de l'air pour former des oxydes d'azote. Le tableau 6.4 présente des exemples des réactions chimiques qui peuvent se produire dans le LEP et conduire à la formation d'ozone et d'oxydes d'azote pouvant être rejetés dans l'atmosphère par le système de ventilation du LEP.

Tableau 6.4

Réactions chimiques potentielles dans le LEP

Formation d'ozone ^a	Formation d'oxydes d'azote
$h\nu + O_2 = O_2^* \text{ }^b$	$N_2 + O_2^* = 2NO$
$O_2^* + O_2 = O_3 + O$	$NO + O_3 = NO_2 + O_2$
$O + O_2 + (M) = O_3 + (M)$	

a. $h\nu$ = énergie lumineuse et (M) = absorption par une molécule de gaz de l'excédent d'énergie cinétique

b. O_2^* = molécule oxygène à l'état excité

Deux stations de mesure des immissions (concentrations ambiantes au niveau du sol) d'ozone et de dioxyde d'azote au voisinage du LEP ont été installées dès 1986 ¹, soit trois ans avant la mise en exploitation du LEP. L'extraction de l'air du tunnel du LEP se faisant par les puits impairs, l'une des stations a été placée près du Point 5 du LEP à Cessy, France, et l'autre près du Point 1 à Meyrin ².

Les résultats sont comparés à ceux d'ECOTOX ³ qui effectue des mesures à Meyrin et à Anières, cette dernière localité étant située sur la rive gauche du lac Léman, dans une zone rurale semblable à celle de Cessy. Le Point 1 du LEP compte également une station de mesure des émissions d'ozone et d'oxydes d'azote sur le conduit d'extraction d'air du tunnel du LEP.

Les résultats de ces mesures montrent que les concentrations en ozone et en dioxyde d'azote dans l'air extrait du tunnel sont légèrement inférieures à celles de Cessy et de Meyrin mais suivent des variations saisonnières similaires. Il est clair que pendant les périodes d'arrêt du LEP, les concentrations mesurées à la sortie du tunnel sont dues à l'introduction de ces mêmes substances par les systèmes de ventilation à partir de l'air ambiant ; la concentration de ces substances se réduit du fait de la décomposition de l'ozone en oxygène et par dépôt ou absorption sur les surfaces dans le tunnel.

Les substances formées pendant l'exploitation de la machine sont, soit présentes en quantités insignifiantes, soit décomposées ou absorbées avant de

1. A. Bonifas, K. Goebel, C.W. Nuttall et H. Schönbacher, Surveillance de l'environnement pour le LEP - Résultats des mesures des paramètres de fond pré-opérationnels de 1985 à 1988, Rapport interne CERN TIS-RP/IR/89-05, 1989
2. D. Mir, R. Magnier, C.W. Nuttall et H. Schönbacher, Mesures de la qualité de l'air au CERN de 1989 à 1991, CERN/TIS-CFM/IR/92-13
R. Magnier, C.W. Nuttall, Mesures de la qualité de l'air au CERN, 1992, CERN/TIS-CFM/IR/93-08
Mesures de la qualité de l'air au CERN en 1993, CERN/TIS-CFM/94-16
Mesures de la qualité de l'air au CERN en 1994, CERN/TIS-CFM/95-12
3. Service cantonal d'écotoxicologie, République et Canton de Genève, Mesures de la qualité de l'air à Genève (1985 à 1995)

pouvoir être évacuées vers l'atmosphère. L'augmentation d'énergie du LEP de 45 à 80 GeV à partir du 10 juillet 1996 n'a pas modifié cette situation.

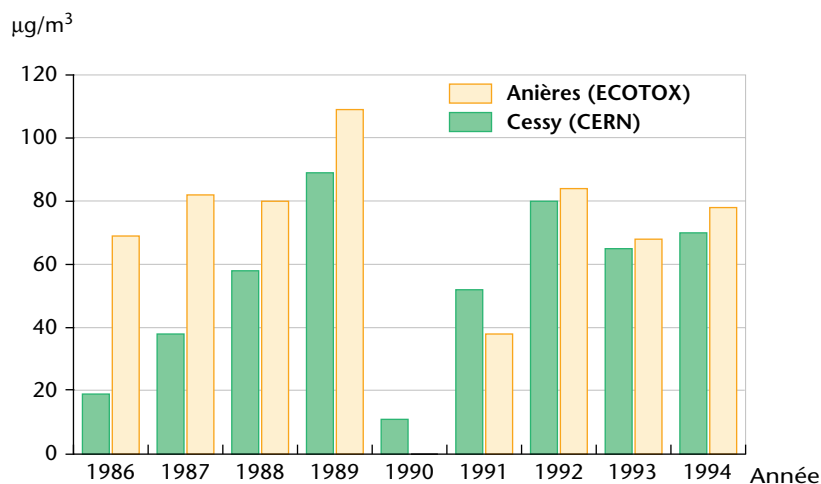


Figure 6.16

Concentrations en ozone au mois de juin entre 1986 et 1994

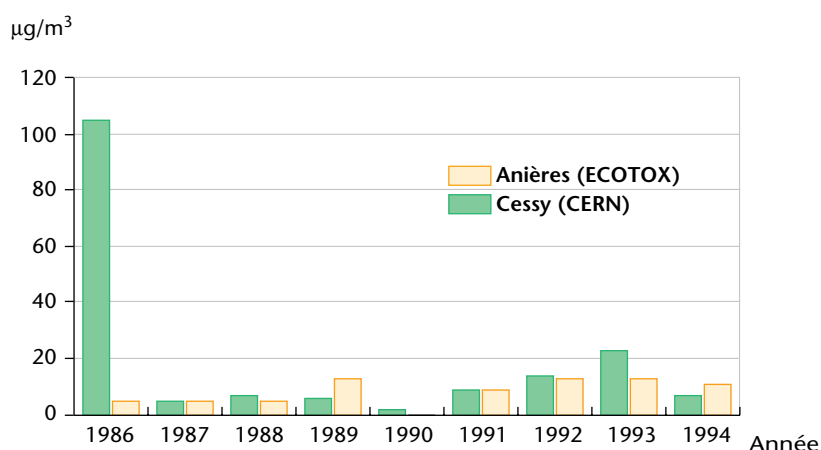


Figure 6.17

Concentrations en dioxyde d'azote au mois de juin entre 1986 et 1994

La comparaison des valeurs mensuelles moyennes mesurées en janvier et en juin de 1986 à 1994 pour l'ozone et le dioxyde d'azote dans les deux stations du CERN avec les valeurs d'ECOTOX (figures 6.16 et 6.17 pour Cessy) montre que des variations se produisent d'une année à l'autre. Cependant, le fonctionnement du CERN n'a aucun effet, car les concentrations de ces substances dans l'air rejeté par le système de ventilation du LEP sont nettement inférieures aux concentrations ambiantes mesurées par ECOTOX pour l'ozone, et présentent des valeurs et variations similaires aux relevés d'ECOTOX pour le dioxyde d'azote. En outre, de décembre à mars, c'est-à-dire pendant la période où la concentration de l'air en dioxyde d'azote est la plus élevée, les accélérateurs du

CERN sont toujours à l'arrêt pour entretien et ils n'ont donc aucune influence quelle qu'elle soit.

6.7.2

Qualité de l'air rejeté par les aéroréfrigérants

Les aéroréfrigérants sont situés aux quatre points pairs du LEP. L'évaporation de l'eau sous un flux d'air pulsé crée le refroidissement voulu. La quantité maximum de vapeur d'eau envoyée dans l'atmosphère par les aéroréfrigérants est d'environ 50 m³/h. Les effets des rejets atmosphériques sur la pluviométrie ou l'humidité ambiante sont insignifiants. L'air rejeté ne contient ni produit chimique ni radioactivité.

Durant les périodes froides de l'année, des panaches de condensation sont visibles. Compte tenu de l'arrêt annuel des installations qui a toujours lieu durant la période hivernale, du mois de novembre aux mois de mars ou avril, le nombre de jours par an où les panaches sont visibles ne dépasse pas la vingtaine.

6.8

Etat radiologique initial

La radioactivité liée aux roches et aux rayons cosmiques existe depuis l'aube des temps et accompagne l'homme dans sa vie quotidienne. Ses nombreuses applications médicales permettent notamment des diagnostics précis et précoces. C'est aussi par la radiothérapie que l'on élimine les cellules malades.

Nous verrons au chapitre 8 que le LHC ne présente pas de risque radiologique pour la population. La radioactivité qui pourrait atteindre les zones hors clôtures des sites d'accès est en effet très nettement inférieure aux fluctuations locales de la radioactivité naturelle (voir paragraphe 6.8.5, page 203).

Pour faciliter la compréhension de l'état radiologique initial et de l'impact du LHC, les notions de base concernant les principales sources de rayonnement, les grandeurs physiques et leurs unités de mesure ainsi que les normes de protection applicables sont données ci-après.

6.8.1

Les rayonnements ionisants

On distingue deux types de rayonnement :

- les rayonnements corpusculaires chargés ou neutres sous forme de particules légères (électrons, muons, etc.) ou plus lourdes (protons, pions, neutrons)
- les rayonnements électromagnétiques : rayons lumineux, rayons X ou gamma (les plus énergétiques) ; l'énergie émise est transportée par les photons.

Les rayonnements sont dits ionisants quand, en interagissant avec la matière, leur énergie est suffisante pour briser les liaisons chimiques entre les atomes d'une molécule et créer des ions (atomes aux couches électroniques incomplètes, donc chargés). Dans ces processus des électrons sont libérés, qui eux-mêmes peuvent provoquer un processus d'ionisation. Ces rayonnements modifient ainsi la structure de la matière et donc aussi celle des tissus vivants. Par l'établissement de normes de radioprotection, on assure un contrôle des effets biologiques.

6.8.2

Les principales sources de rayonnements

6.8.2.1

La radioactivité

On dit qu'un atome est radioactif lorsque son noyau se transforme spontanément et entraîne l'émission de rayonnements. Le noyau instable ou radioactif se désintègre jusqu'à la formation d'un noyau stable. Les rayonnements émis se classent en quatre catégories :

- les rayonnements alpha : les particules émises sont des noyaux d'hélium, formés de deux protons et de deux neutrons
- les rayonnements bêta : la particule émise est un électron négatif ou positif, le positon
- les rayonnements gamma : ils véhiculent sous forme de photons sans charge ni masse l'excès d'énergie d'un noyau dit alors "excité", dont les nucléons (protons et neutrons) sont en nombre stable
- l'émission de neutrons (particules neutres).

La radioactivité peut être naturelle (l'uranium de la nature se transforme peu à peu en plomb). Elle peut être artificielle, à partir de radionucléides obtenus par réactions nucléaires sur des éléments stables ou instables, en particulier dans les réacteurs nucléaires.

On appelle période radioactive (ou plus justement demi-vie) le temps au bout duquel le nombre d'atomes radioactifs restants est égal à la moitié du nombre initial ; selon l'élément, cette période peut varier d'une fraction de seconde à des millions d'années.

L'activité d'un corps radioactif se mesure par le nombre de désintégrations par seconde. L'unité de mesure de la radioactivité est le becquerel (1 désintégration par seconde) ; l'ancienne unité, le curie, est l'activité de 1 gramme de radium 226 et vaut 37 milliards de becquerels.

6.8.2.2

Les rayonnements cosmiques

La surface de la terre est en permanence exposée aux rayonnements cosmiques provenant du soleil et des étoiles, formés principalement à l'origine de photons de très haute énergie qui interagissent avec les couches atmosphériques pour donner naissance à d'autres particules, surtout des protons, neutrons et muons.

Celles-ci à leur tour peuvent induire de la radioactivité. Le fameux carbone 14 radioactif est le résultat de l'action des neutrons cosmiques sur l'azote de la nature, principalement celui contenu dans l'air.

Chaque seconde, la surface de notre main est traversée par un muon cosmique.

6.8.2.3

Les particules créées à des fins industrielles ou médicales

Ces particules sont une autre forme de rayonnement. Les électrons des tubes de télévision sont émis par une cathode chauffée et accélérés par une haute tension vers l'écran lumineux. Les rayons électromagnétiques (par exemple les rayons X) sont émis par les atomes excités dont les électrons tombent d'une couche électronique à une autre.

Des particules (électrons ou protons) accélérées dans les accélérateurs de particules sont utilisées à des fins médicales ou de recherche.

Dans les accélérateurs, les particules accélérées font des réactions nucléaires avec la matière qu'elles rencontrent. Pour les énergies élevées, ces réactions produisent des cascades hadroniques formées de toutes sortes de particules absorbées dans les blindages. Ces particules secondaires induisent de la radioactivité. En dehors des blindages, seules les particules faiblement interagissantes subsistent ; elles ne produisent pas de radioactivité mais sont néanmoins source de rayonnement.

La relation entre les trois unités de mesure est bien illustrée par l'image d'un enfant lançant des boules de neige en direction d'un camarade.

Le nombre de boules envoyées équivaut au nombre de rayonnements émis par une source radioactive, c'est-à-dire son activité (en becquerels).

Le nombre de boules reçues par le camarade correspond à la dose absorbée (en grays).

Les marques laissées sur son corps selon la nature des objets, lourds ou légers, est la dose efficace (en sieverts).



Figure 6.18

Relation entre les unités de mesure radiologiques

6.8.3

Les normes de radioprotection

Dans les normes de radioprotection, on distingue les rayonnements externes et les rayonnements internes.

Dans le cas des rayonnements externes, le corps est directement exposé aux rayonnements ionisants. Les facteurs qui déterminent l'importance des dégâts causés par l'irradiation sur les tissus vivants sont :

- la dose absorbée, qui est définie comme la quantité d'énergie absorbée par unité de masse de tissu ; elle s'exprime en gray (Gy), c'est-à-dire en joule (unité d'énergie) par kilogramme (unité de masse) ¹ ;
- le débit de dose absorbée, qui est l'étalement de l'irradiation dans le temps et peut intervenir sur la capacité de restauration de l'organisme ;
- la nature des rayonnements ;
- la nature des tissus irradiés.

C'est pourquoi, on a défini une *grandeur* physique qui, en tenant compte de ces divers éléments, est représentative du rayonnement et exprime l'effet biologique, la *dose efficace*. Cette unité est le sievert (Sv).

On convertit la dose absorbée en dose efficace en appliquant d'abord un facteur de pondération tissulaire pour prendre en considération la sensibilité des différents organes du corps aux rayonnements ionisants. On tient ensuite compte de la nocivité du rayonnement en introduisant un facteur de pondération radiologique. Ce facteur, de 1 pour les électrons et les rayons X ou gamma, varie entre 5 et 20 pour les neutrons et est de 20 pour les rayonnements alpha.

Une contamination interne, causée par des éléments radioactifs fixés par incorporation dans l'organisme, provoque l'irradiation locale des tissus. Un facteur de dose efficace (en sieverts par becquerel) est appliqué pour chaque radionucléide en se basant en particulier sur le métabolisme dans l'organisme humain après ingestion ².

Les valeurs de référence qui ont été établies pour les rejets de substances radioactives dans l'environnement prennent en considération l'incorporation de ces substances. Ce sont ces normes qui sont du plus grand intérêt autour des accélérateurs.

En France, l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI) effectue des milliers de mesures chaque mois pour contrôler la radioactivité des eaux, de l'air, des aliments traités, etc. L'OPRI dispose de plus de 1 000 stations de mesure réparties sur tout le territoire.

1. L'ancienne unité était le rad (1 Gy = 100 rad).

2. Recommandations de la Commission internationale pour la protection contre les radiations (CIPR) pour 1990, Publication 60, Annales de la CIPR, 21, 4 (1991).

L'une de ces stations est installée à Cessy. Du côté suisse, une station similaire existe à Meyrin (voir figure 6.19). Les résultats de ces mesures sont comparés en continu aux normes réglementaires. Les résultats de la station de Cessy sont accessibles à tous par le Minitel, code 3614 MAGNUS.



Figure 6.19

Station de mesures de Meyrin

6.8.4

L'exposition moyenne en France

L'exposition moyenne annuelle en France est de 4 mSv. La majeure partie de cette dose efficace est d'origine naturelle. Les expositions peuvent varier dans de grandes proportions selon la nature des sols. Les doses reçues par le biais des rayonnements cosmiques correspondent à 0,3 mSv par an, mais augmentent avec l'altitude. Ainsi, un voyage aller et retour en avion entre Paris et New-York correspond à une dose de 0,04 mSv. L'autre partie est surtout due aux expositions médicales. Un examen radiologique du bassin au scanner correspond par exemple à une dose de 9 mSv.

La figure 6.20 montre la contribution annuelle des différentes sources à l'exposition de la population française aux rayonnements ¹.

1. d'après l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN)

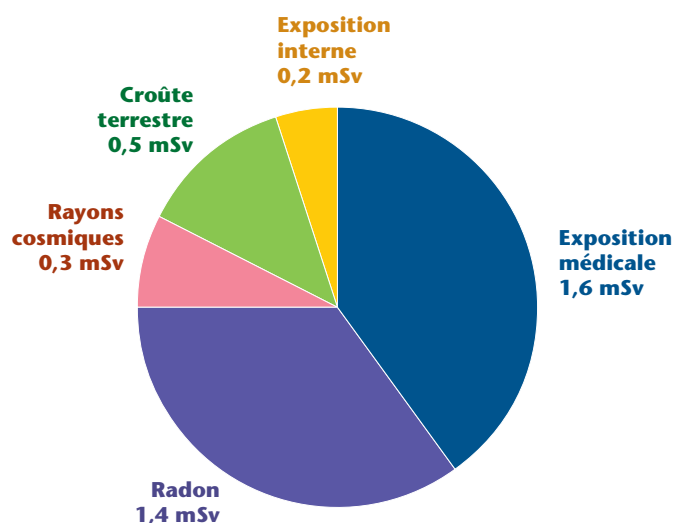


Figure 6.20

Contributions annuelles à l'exposition aux rayonnements en France

6.8.5

L'état radiologique initial pour le LHC

L'état radiologique d'une région géographique est déterminé par les sources naturelles de rayonnements ionisants. Il varie d'un endroit à un autre en fonction des caractéristiques locales des terrains. La figure 6.21 illustre ces variations pour différentes communes de la région lémanique. Une influence radiologique éventuelle du fonctionnement du LHC sur l'environnement se superposerait à cet état radiologique initial.

Le groupe de radioprotection du CERN effectue régulièrement des mesures de routine dans l'environnement. Ces mesures incluent le contrôle de l'émission de la radioactivité dans l'air et dans l'eau ainsi que de sa dispersion dans l'environnement. Elles montrent que l'influence radiologique des installations existantes du CERN est négligeable. L'évolution des rayonnements ionisants externes diffusés pendant le fonctionnement des accélérateurs est étroitement suivie. Les résultats de ces mesures sont transmis régulièrement aux autorités françaises et suisses sous forme de rapports mensuels, trimestriels ou annuels (voir Annexe technique n° 5, "Impact radiologique du LHC sur l'environnement").

Le programme de mesures précédant le fonctionnement du LEP a débuté en 1985 et a été poursuivi depuis sa mise en service. Les résultats ont montré qu'une influence radiologique du LEP sur l'environnement n'est pas détectable. Les résultats de ces mesures sont représentatifs de l'état initial radiologique du site du LHC.

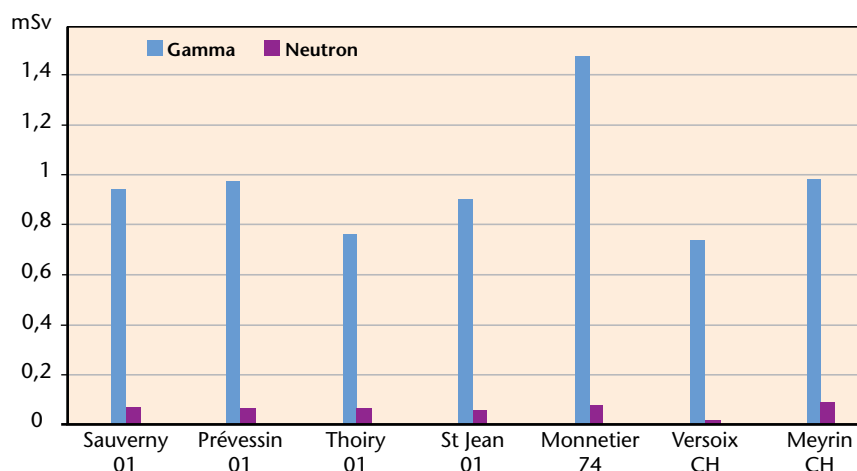


Figure 6.21

Doses intégrées en 1995 pour différentes communes de la région lémanique

En plus de ces mesures de routine, des études particulières sur la radioactivité dans le Pays de Gex ont été réalisées dans le cadre de plusieurs rapports spécifiques ¹.

La radioactivité contenue dans les couches superficielles de la Terre est constituée principalement de trois composants :

- les radionucléides naturels produits à partir des isotopes primordiaux, à savoir l'uranium 235, l'uranium 238, le thorium 232 et leurs filiations, ainsi que le potassium 40 qui constitue 0,0118% du potassium naturel
- les radionucléides naturels produits par les rayonnements cosmiques dont les plus importants sont le carbone 14, le béryllium 7 et le tritium
- les radionucléides artificiels d'une longue demi-vie à la suite des essais nucléaires en surface et de l'accident de Tchernobyl.

Les mesures de la radioactivité dans les couches de terre autour du CERN ont montré des compositions normales de radionucléides naturels. Les résultats de quatre campagnes de mesure sont présentés dans le tableau 6.5.

La prise d'échantillons s'est concentrée sur les parties de terrain qui pourraient être affectées par le fonctionnement du LHC, donc surtout autour des puits d'accès du LEP.

En ce qui concerne la radioactivité naturelle, c'est le radium dans le sol qui montre les plus grandes variations, de 24 à 96 Bq/kg, ce qui s'explique par la composition des échantillons qui contiennent plus ou moins de matière granitique. La concentration spécifique du radionucléide artificiel ¹³⁷Cs varie entre 1 Bq/kg pour les zones qui apparemment n'ont été ni touchées par les

1. voir Annexe technique n° 5, "Impact radiologique du LHC sur l'environnement"

retombées des essais nucléaires ni par celles de Tchernobyl, et une valeur maximale de 97 Bq/kg pour les zones les plus affectées.

Le “bruit de fond” des rayonnements ionisants à la surface de la Terre se compose d’une contribution terrestre et d’une contribution cosmique. Il est possible de calculer dans une bonne approximation la contribution du composant terrestre à partir des radionucléides identifiés et de leurs spectres photoniques.

Pour se faire une image globale de la distribution géographique du bruit de fond dans la région, des mesures y ont été effectuées à l’aide d’un système mobile, en particulier dans la campagne entre les communes de Bourdigny et d’Echenevex sur une ligne sud-nord, ainsi qu’entre le lac Léman et le pied du Jura sur une ligne est-ouest ¹.

Tableau 6.5

Radioactivité initiale en Bq/kg autour des sites du futur LHC ^a

Site	⁴⁰ K	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²²⁶ Ra	²²⁸ Ac	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
Prévessin-Moëns	526	37,6	19,8	87,1	30,2	2,6	10,6
Saint Genis-Pouilly	424	35,2	24,5	95,7	30,1		9,9
Lac Léman	378			26,8	32,9	5,0	39,4
Puits 1	360			30	24	1	11
Puits 1 nord-est	413			41,3	28,9	1,3	20,4
Puits 1 nord-est 1	557	39,2	34,2	60,6	40,0	2,3	11,7
Puits 1 nord-est 2	116	18,0	25,5	40,9	31,3	4,7	6,4
Puits 1 nord-ouest	360			24,1	27,2	3,3	31,8
Puits 1 sud-ouest	430			30,1	30,3		8,2
Puits 1 sud-ouest 1	455	35,2	27,5	40,5	31,8	2,6	1,2
Puits 1 sud-ouest 2	477	35,2	27,0	39,6	33,8		7,3
Puits 2	350			30	25	3	30
Puits 2	462	39,5	21,9	89,8	26,0		9,6
Puits 3 nord-est 1	225			65,5	23,6	4,4	56,9
Puits 3 nord-est 2	196			29,1	16,3	4,9	57,4
Puits 5	320			30	26		7

1. Annexe technique n° 5, “Impact radiologique du LHC sur l’environnement”

Tableau 6.5

Radioactivité initiale en Bq/kg autour des sites du futur LHC ^a (suite)

Site	⁴⁰ K	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²²⁶ Ra	²²⁸ Ac	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
Puits 5 nord-est	377			52,3	33,2	4,1	48,8
Puits 5 nord-est 1	557	39,2	34,2	60,6	40,0	2,3	11,7
Puits 5 nord-est 2	488	36,2	32,7	55,5	35,8	2,2	11,0
Puits 5 sud-ouest	452			69,2	43,0	6,6	79,6
Puits 5 sud-ouest 1	523	46,8	34,2	55,8	43,2	2,2	23,5
Puits 5 sud-ouest 2	495	38,7	31,8	49,8	38,5		25,0
Puits 7 sud-ouest	375			38,8	32,0	9,5	87,0
Puits 7 nord-est 1	283			40,0	23,5	9,7	97,1
Puits 7 nord-est 2	495			40,0	33,3	3,9	62,2
Puits 8	392	31,0	21,9	79,5	26,0	3,1	10,9

a. Voir Annexe technique n° 5, "Impact radiologique du LHC sur l'environnement"

Les conclusions concernant la radioactivité et les rayonnements ionisants dans le bassin lémanique sont les suivantes :

Le calcaire du Jura est très peu radioactif tandis que la moraine argileuse contient plus de radioactivité naturelle. Il y a peu de différence entre les terres cultivées (influence des engrais) et les zones boisées non touchées par l'activité humaine.

Les mesures radiologiques sur les sites actuels du LEP, qui sont les futurs sites du LHC, ont montré que le fonctionnement des accélérateurs du CERN n'a pas d'influence sur le niveau de rayonnements ionisants dans le Pays de Gex.

Du fait que le niveau normal du rayonnement neutron est très bas, de faibles apports dus au fonctionnement des accélérateurs seraient facilement visibles s'ils devaient dépasser le bruit de fond naturel. La concentration du ⁷Be dans l'air et dans la boue des rivières est un autre paramètre qui sera suivi attentivement avec le LHC.

6.9

Etat chimique initial

Les sites du CERN en général et du LEP en particulier ne sont pas le siège d'activités chimiques particulières et on ne trouve pas de stockage de produits dangereux présentant des risques pour l'homme ou pour l'environnement.

Les détecteurs de particules emploient des mélanges gazeux à base de gaz inertes et de gaz inflammables tels que dioxyde de carbone, argon, xénon et méthane, butane, éthane, etc. Les quantités totales de gaz inflammables pour chaque expérience et les précautions prises sont présentées dans l'Annexe technique n° 2, "Rapport définitif de sûreté du LEP".

6.10

Traitement des déchets

Les faibles quantités de déchets en provenance des sites du LEP sont ramassés et traités selon une procédure commune à l'ensemble du CERN. C'est cette procédure qui est décrite ci-après.

6.10.1

Les déchets ordinaires

Il s'agit des déchets provenant des restaurants et du nettoyage des bâtiments (2 600 tonnes par an). Ces déchets sont entreposés dans des containers de 800 litres et collectés tous les deux jours. Tous ces déchets sont incinérés avec revalorisation énergétique à l'usine d'incinération des Cheneviers, en Suisse, suivant une procédure agréée avec les deux Etats-hôtes.

6.10.2

Les déchets recyclés

Les déchets de papier et carton (380 tonnes par an) sont triés à la source et collectés en vue de leur recyclage.

Des containers spéciaux sur le site sont destinés à la récupération du verre (7 tonnes par an). Les boîtes de boissons en aluminium sont récupérées.

6.10.3

Les déchets inertes

Il s'agit des déchets de démolition : déblais, gravats, collectés dans des bennes. Une partie de ces déchets va à la décharge d'Aire en Suisse, l'autre partie, notamment les bétons, est recyclée par une firme suisse spécialisée.

6.10.4

Les déchets des espaces verts

La majeure partie des déchets provenant des espaces verts fait l'objet d'un recyclage. Les feuilles et les déchets de tonte sont compostés. Les branchages sont broyés et utilisés pour le paillage des nouvelles plantations.

6.10.5

Les déchets industriels

Ce sont des déchets potentiellement polluants. Ils sont triés à la source dans des containers spéciaux, collectés sur le site de Meyrin du CERN (Suisse), puis traités par les usines de traitement agréées, principalement à l'usine des Cheneviers

pour les acides et alcalins, les bains de rinçage et de développement des photos, les solvants, les huiles et les hydrocarbures. Les piles et les batteries sont collectées et traitées dans des usines agréées suisses et françaises.

6.10.6

Les déchets radioactifs

Les matériaux et objets radioactifs ne présentant plus d'utilité pour le Laboratoire sont collectés dans une zone de conditionnement sur le site du CERN. Ils sont ensuite transférés dans une zone de stockage où toutes les précautions sont prises pour informer les personnes, et pour limiter les accès aux seules personnes autorisées. Ces déchets sont évacués et éliminés dans des centres nationaux agréés, l'ANDRA ¹ pour la France et le PSI ² pour la Suisse. Ces institutions sont chargées de la gestion et du stockage des déchets radioactifs solides.

6.11

Le bruit

Les appareillages ou les équipements bruyants nécessaires au fonctionnement du LHC sont à peu de choses près de même nature et du même nombre que ceux du LEP. Ils sont tous situés sur les sites de surface, soit dans les bâtiments techniques, soit à l'extérieur de ces bâtiments.

Les principaux appareillages sources de bruit sont essentiellement : les groupes électrogènes, les transformateurs, les convertisseurs de puissance, les compresseurs, les échangeurs atmosphériques et les unités de traitement d'air. Les principes de la prévention des nuisances sonores liées à ces appareillages sont énoncés dans l'Annexe technique n° 2, "Rapport définitif de sûreté du LEP".

Le bruit est un phénomène essentiellement fluctuant au cours du temps, on ne peut donc le caractériser qu'avec des valeurs conventionnelles : bruit de crête, bruit de fond ou bruit moyen, ces valeurs constituant en fait des moyennes sur une période donnée. On décompose donc le temps de mesure en intervalles élémentaires et on mesure le bruit pour chacune. Le dB(A) permet de caractériser un son ou un bruit en tenant compte des réactions de l'oreille humaine suivant les types et les fréquences des bruits ³.

1. Agence nationale des déchets radioactifs, Chatenay-Malabry

2. Paul Scherrer Institut, Villigen

3. Le dB(A) représente un niveau de pression exprimé en dB et pondéré selon le filtre A (niveaux de bruit faibles) pour tenir compte des différences de sensibilité à l'oreille.

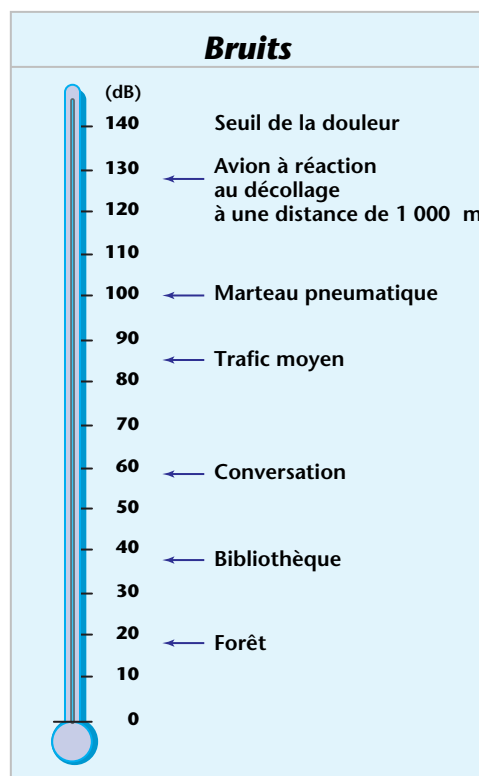


Figure 6.22

Niveaux de pression sonore et bruits équivalents

En France et en Suisse, on a admis de mesurer le L_{eq} ou niveau acoustique équivalent, pour mesurer le bruit perçu.

Les valeurs maxima des niveaux de bruit admissibles en limite de propriété CERN sont fondés sur les textes législatifs en vigueur ¹, le Code de sécurité A8 du CERN et les campagnes de mesures. Selon la norme NFS 31.01.0, elles prennent en compte deux termes correctifs définissant une valeur limite d'indicateur d'émergence de niveau (e), telle que :

$$e = e_0 + C_E$$

où e_0 est une valeur critique d'émergence, fonction de la période de la journée pendant laquelle se manifeste le bruit particulier, et C_E un terme correctif tenant compte de la durée cumulée des périodes d'apparition du bruit particulier dans l'intervalle de temps considéré.

1. Norme NFS 31.01.0 de novembre 1987, arrêtés du 20 août 1985 et du 1er mars 1993.

Tableau 6.6

Intervalles de référence et valeur critique d'émergence

Période de la journée	Intervalle de référence T_{ref}	Valeur critique d'émergence e_0
diurne	07 h - 22 h	5 dB
nocturne	22 h - 07 h	3 dB

Tableau 6.7

Valeur du terme correctif d'émergence C_E en fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit particulier

Durée cumulée d'apparition du bruit particulier (T)	Terme correctif C_E en décibels
30 secondes < T ≤ 1 minute	9
1 minute < T ≤ 2 minutes	8
2 minutes < T ≤ 5 minutes	7
5 minutes < T ≤ 10 minutes	6
10 minutes < T ≤ 20 minutes	5
20 minutes < T ≤ 45 minutes	4
45 minutes < T ≤ 2 heures	3
2 heures < T ≤ 4 heures	2
4 heures < T ≤ 8 heures	1
T > 8 heures	0

Les valeurs maxima admissibles sont donc de 55 dB(A) de 7 heures à 22 heures et 43 dB(A) de 22 heures à 7 heures. En toute période on pourra également tolérer une émergence de 0 à 9 dB(A) selon la durée d'apparition du bruit particulier.

Des campagnes de mesures annuelles des niveaux sonores, en limite des clôtures des installations de surface des sites, sont effectuées par le CERN. Ces mesures montrent que les niveaux sonores en limite de clôture sont dans les limites fixées par la réglementation. Toutefois, le CERN s'efforce en permanence d'améliorer les protections phoniques autour de ses installations.

Pour évaluer l'efficacité de ces améliorations et pour vérifier ses propres mesures, le CERN a commandé, durant l'année 1995, deux campagnes de mesures à l'APAVE, laboratoire français agréé. La première campagne a été effectuée du 1 au 15 février 1995 alors que la majorité des installations du LEP étaient à l'arrêt, et la seconde pendant la deuxième quinzaine de novembre 1995 avec toutes les installations du LEP en fonctionnement, et donc avec le maximum possible de nuisances sonores (voir Annexe technique n° 6, "Mesures des niveaux sonores autour de l'anneau du LEP").

Ces mesures confirment qu'en fonctionnement maximum les installations du LEP, et donc celles du LHC, n'augmentent que très peu le niveau sonore dans l'environnement ; en outre, celui-ci reste dans tous les cas en-dessous des limites autorisées par la réglementation.

6.12

Les excavations et carrières du Pays de Gex

Le Pays de Gex compte actuellement 15 carrières en exploitation.

Les dernières études réalisées par la Direction départementale de l'équipement de l'Ain (DDE 01) montrent que, pour une consommation annuelle de granulats de 8 tonnes par habitant sur le plan national et de 12 tonnes par habitant dans l'Ain, celle du Pays de Gex se monte à 19 tonnes par habitant. Cette consommation inclut les exportations vers la Suisse.

En 1991, la production du Pays de Gex a été de 1 200 000 tonnes de granulats dont 200 000 tonnes de roche concassée (ce qui représente près de 23 tonnes par habitant). Il faut considérer que cette production est un maximum car, dès 1992, certaines carrières ont ralenti en raison de la chute de la demande suisse.

L'analyse de l'année 1992 montre que plus de 80% de la production est assurée par cinq carrières (sur 15). Or, l'avenir de ces grandes carrières est précaire, il n'est pas assuré au-delà de trois ans et les petites carrières n'ont pas la capacité d'assurer la relève. Les réserves de ces dernières sont également limitées à court terme.

Les gisements en matériaux alluvionnaires sont limités en surface, en qualité, et par des contraintes telles que l'urbanisation, la protection des captages d'eau ou autres.

Les gisements de roche massive sont illimités mais pour des raisons d'urbanisation, de protection des paysages, des sites et de l'environnement, leur exploitation devient de plus en plus problématique.

6.13

La flore

6.13.1

La flore du Pays de Gex

Sans avoir la diversité de la flore alpine, la flore du Jura se révèle très riche, particulièrement celle de la haute chaîne.



D'après les botanistes, c'est plus de 400 espèces qu'on peut y trouver. Certaines de ces espèces sont abondantes, d'autres rares.

Ainsi trouve-t-on des prairies à *Viola calcarata*, des peuplements de pins à crochet, des formations de rhododendrons ferrugineux, des éboulis à *Eyrimum ochroleucum*, des lys Martagon, des pédiculaires feuillues (*Pedicularis foliosa*), des sabots de Vénus (*Cypripedium calceolus*), des chardons bleus (*Eryngium alpinum*), des camarines (*Empetrum nigrum*), des trèfles jaunâtres, des gentianes, etc.

Figure 6.23

Orchis pyramidal, que l'on trouve en grande quantité au CERN



Figure 6.24

Gentiane jaune sur le Jura

On trouve aussi dans les prairies humides quelques plantes rares tel l'épipactis des marais. Les pelouses sèches quant à elles abritent de nombreuses orchidées. On peut citer par exemple l'orchis brûlé (*Orchis ustulata*) et le limotore (*Limodorum abortivum*). Les pelouses du piémont sont souvent riches en orchidées, y compris sur le site même du CERN à Meyrin où certaines zones sont protégées afin de préserver ces espèces.



Figure 6.25

Cephalanthera longifolia (rare) et *Solanum dulcamara*

6.13.2

La flore dans les zones de travaux

Les zones prévues pour l'extension des sites du LEP pour le LHC, ainsi que pour les dépôts des déblais, sont soit des zones agricoles soit des zones déjà déboisées. Elles ne présentent aucun intérêt floristique particulier.

La zone prévue pour le dépôt des déblais à Prévessin-Moëns est une zone de déboisement obligatoire puisque située sous une ligne électrique à haute tension. La flore est sans intérêt du point de vue botanique, composée d'arbres divers ne dépassant guère 2 mètres, avec quelques arbres de 3 à 4 mètres dont *Quercus robur*. L. ou *Quercus petraea*. Liebl.

Sur le sol argileux avec des plaques d'eau saumâtre, ne se trouvent que des mousses et des joncs, *Juncus conglomeratus*. L. ou *Juncus effusus*. L., des restes séchés de fougères.

Le site prévu pour le dépôt des déblais au Point 5, au lieu-dit Les Mouilllets est un grand pré en légère pente couvert d'herbe. Aucune espèce florale de valeur, soit par sa rareté, soit par sa beauté, ne pousse dans cette zone comprise entre Cessy, Segny et Versonnex.

Le site prévu pour le dépôt des déblais au Point 6 à Versonnex est un bois sans valeur marchande, ne comprenant que deux types de résineux *Abies pectinata* de 40 cm de circonférence environ et hauts d'environ 5 à 6 mètres. Le reste est composé de *Quercus robur. L.* de deux à trois mètres de haut, de *Corylus avellana. L.*, et de quelques saules *Salix alba. L.* Le sol de ce bois est en effet très humide et on y trouve d'ailleurs du paturin commun (*Poa trivialis. L.*), qui pousse dans les forêts humides.



Figure 6.26

Anémone sylvie

6.14

La faune

6.14.1

La faune du Pays de Gex

La faune présente dans le Pays de Gex est très variée. Une réserve naturelle a été créée sur la haute chaîne du Jura, dans le but de protéger le milieu floristique et faunistique et de préserver le patrimoine naturel. Tous les sites du CERN sont éloignés du périmètre de cette réserve.

Quelques espèces telle que le grand tétras et la loutre sont en voie de disparition à cause de la fréquentation touristique de la haute chaîne, sur laquelle on trouve des chamois, voire des lynx venus du Jura neuchâtelois.



Figure 6.27

Grand tétras

Dans son ensemble, la zone du LEP/LHC est constituée de plaines, de bois et de rivières et forme un paysage bocager offrant à la faune des milieux diversifiés. On y rencontre des lièvres, des lapins de garenne (introduit), des perdrix et des faisans en faible quantité.



Figure 6.28

Lapin dans la neige

Le cerf est présent en faible quantité ¹ à certaines périodes de l'année et le sanglier est de passage. Les chevreuils sont les mammifères les plus nombreux et ils sont sédentaires. Les mustélidés (belette, blaireau, fouine, hermine, martre et putois localement), les renards et les blaireaux sont abondants.



Figure 6.29

Chevreuil au printemps ²

En ce qui concerne les oiseaux, on en trouve une grande variété sur la chaîne, plus de cent espèces. Ainsi y nichent : le grand tétras (menacé), la chouette, l'autour des palombes, le pic noir, le merle de roche, le merle à plastron, l'hirondelle des rochers, le martinet à ventre blanc, le faucon pèlerin.

Les secteurs les plus riches pour l'avifaune correspondent toutefois aux milieux agricoles traditionnels extensifs et aux coteaux buissonneux et ensoleillés. On y trouve encore ponctuellement l'alouette lulu et le tarier des prés, espèces devenues particulièrement rares en plaine dans la région lémanique, ainsi que le bruant zizi et le bruant proyer, deux autres espèces rares au niveau régional.

De plus, pour l'ensemble du périmètre, on note un certain nombre d'espèces menacées et liées au milieu bocager. Les plus remarquables sont : la bondrée apivore, la chouette chevêche, la fauvette grisette et la pie-grièche écorcheur, le coucou gris, le pipit des arbres, le tarier pâle, l'hypolaïs polyglotte et le rossignol philomèle, encore répandus mais en nette régression pour la plupart.

Un site classé ZNIEFF II, le marais de Chevry, mérite encore d'être mentionné pour son avifaune particulière. Il abrite la rousserolle verderolle et la rousserolle

1. Il a en effet besoin d'espaces boisés importants.

2. Chevrette

effarvatte, ainsi que la fauvette babillarde et la locustelle tachetée (nicheurs possibles).

Pour ce qui est des reptiles et des batraciens, ils sont représentés par de nombreuses variétés, même si le nord du Pays de Gex ne présente, dans sa partie bocagère, que peu de milieux favorables pour les batraciens. Dans le périmètre régional, la plupart des sites importants se situent en limite est (étangs des bois de la Versoix). Les espèces suivantes y sont connues : triton alpestre, triton helvétique, crapaud commun, sonneur à ventre jaune, grenouille rousse et grenouille agile. On note également ponctuellement la présence du crapaud calamite (notamment à Mategnin). Enfin, les petits vallons du pied du Jura sont potentiellement favorables à la salamandre tachetée.

Concernant les reptiles, Les milieux séchards et extensifs du pied du Jura sont certainement les plus favorables. Les espèces suivantes sont potentiellement présentes : orvet, lézard agile, lézard des murailles, lézard vert, coronelle lisse, couleuvre vipérine, couleuvre à collier, vipère aspic.



Figure 6.30

Asealaphe, caractéristique des prairies sèches

6.14.2

La faune dans les zones de travaux

Les zones prévues pour l'extension des sites du LEP pour le LHC étant des zones agricoles, elles n'abritent pas de faune particulière.

La zone prévue pour le dépôt des déblais dans le secteur du bois de Serves occupe une surface au sol faible en regard de la surface de l'ensemble du massif. Elle est située à l'emplacement de l'ancienne coupe rase réalisée en 1988 pour la construction de la ligne électrique 400 kV. Le terrain étant très humide dans cette zone, le sous-bois peu entretenu est dense, hormis dans la zone du golf (9 trous) et du parcours Vita.

Sous la ligne à haute tension et entre les trois pylônes, la végétation s'est développée sous forme de taillis depuis la coupe rase de 1988. Le site est humide : on y trouve de nombreuses dépressions de tailles et de formes variables, où la végétation hydrophile s'est développée. Les diverses petites dépressions humides du périmètre immédiat sont potentiellement des milieux propices à la reproduction de certaines espèces de batraciens, et en particulier la grenouille rousse, le crapaud commun et le triton alpestre.

Le massif du Bois de Serves s'intègre dans le territoire de quelques cerfs (3-4 individus), et il abrite un petit peuplement de chevreuils qui circulent entre le Bois de Serves et le Bois Tollot. Le sanglier est parfois présent.



Figure 6.31

Sanglier

La zone prévue pour le dépôt des déblais en contrebas du Point 5 est composée de terrains agricoles coupés de haies et n'est donc pas d'un intérêt faunistique particulier. On y rencontre surtout des oiseaux ¹, des lièvres et de petits prédateurs (renards,...).

La zone prévue pour le dépôt des déblais au Point 6 à Versonnex se trouve derrière le site actuel du CERN, au sud-est du lotissement de Bois Chatton. La zone concernée est de faible surface. Cette zone de bois en partie éclaircie est essentiellement un point de passage de grande faune et de prédateurs (chevreuils, sangliers, cerfs parfois, renards) vers les bois suisses. Concernant l'avifaune, le périmètre doit potentiellement abriter la tourterelle des bois, le loriot, le pic vert, et le grosbec casse-noyaux.

1. Les principales espèces nicheuses sont les suivantes : le coucou gris, le pic vert, le rossignol philomèle, le tarier pâtre, l'hypolais polyglotte, la fauvette grisette, le pipit des arbres, la pie-grièche écorcheur et le bruant jaune.



Figure 6.32

Canards colverts au printemps au dessus de l'étang du Point 6

6.15

L'activité et l'occupation du sol

6.15.1

La population

La population du Pays de Gex atteignait au dernier recensement le nombre de 52 200 habitants, soit une densité de 122 habitants par km² contre 82 habitants par km² pour le département de l'Ain. Toutefois, cette population est inégalement répartie entre le nord très urbanisé (322 habitants par km² dans le canton de Ferney-Voltaire) et le sud du Pays de Gex.

Depuis 1975, l'accroissement démographique du Pays de Gex est deux fois supérieur à celui du département de l'Ain, avec des taux de croissance annuels de + 2,4% (1975-1982) et + 3,1% (1982-1990) contre + 1,5% pour le département. La part du solde migratoire dans l'accroissement démographique ne cesse d'augmenter pour chacune des communes, et seule Ferney-Voltaire doit l'augmentation de sa population au solde naturel entre 1982 et 1990. Pas moins de 84% de l'accroissement de la population gessienne durant cette période est dû à un solde migratoire positif.

La vitalité démographique du Pays de Gex s'explique par la proximité immédiate de l'agglomération de Genève et l'attractivité des salaires suisses et genevois en raison du taux de change.

Au total 111 nationalités sont représentées dans le Pays de Gex.

6.15.2**Le logement**

La fonction résidentielle du Pays de Gex s'est fortement affirmée depuis 20 ans. Le parc de logements gessien compte 24 090 logements, plus du quart ayant été construit après 1982 ¹. Les résidences principales (80% de l'ensemble des logements) sont, pour la moitié d'entre elles, des maisons individuelles et 54% des ménages sont propriétaires.

Les paysages urbains sont très différents selon les communes. Ainsi, plus de 75% de l'habitat de Sergy est composé de maisons individuelles pour seulement 17% à Ferney-Voltaire et 34% à Saint Genis-Pouilly.

La croissance rapide de la demande, la présence des frontaliers (à pouvoir d'achat élevé) et d'investisseurs étrangers, notamment suisses, ont contribué à maintenir dès les années quatre-vingt une forte pression sur le foncier et une tension sur le marché du logement, dans le quadrilatère Thoiry/Ferney-Voltaire/Divonne-les-Bains/Gex et le long de la RD 984.

Le Pays de Gex disposait en outre en 1991 de 58 logements sociaux pour 1 000 habitants, chiffre comparable à la moyenne départementale, mais les prix du marché, beaucoup plus élevés que dans le reste du territoire, rendent certaines populations au revenu moyen incapables d'assumer le coût d'une location dans le secteur privé. Le parc social est concentré dans les principaux pôles urbains.

Tableau 6.8**Nombre de logements locatifs sociaux dans le Pays de Gex de 1990 à 1993**

Années	Nombre de logements locatifs sociaux
1990	2 662
1991	2 789
1992	2 950
1993	3 101

6.15.3**L'activité et l'emploi****6.15.3.1****Population active**

Le taux d'activité de la population gessienne est de 51,3% pour l'ensemble du Pays de Gex. Ce taux est inférieur à la moyenne départementale (59,2%). Trois actifs sur quatre travaillent hors de leur commune de résidence. Le travail frontalier caractérise fortement cette zone géographique et le marché de l'emploi y est très dépendant de la conjoncture suisse. Le travail dans le canton de Genève

1. Chiffres 1990

est un phénomène déjà ancien (voir figure 6.33) et qui a progressé régulièrement. De ce fait, la population des frontaliers présente une pyramide d'âge identique à celle de l'ensemble de la population active de l'Ain et de la Haute-Savoie. Le phénomène du travail frontalier dans le canton de Vaud est en revanche beaucoup plus récent et concerne une population plus jeune.

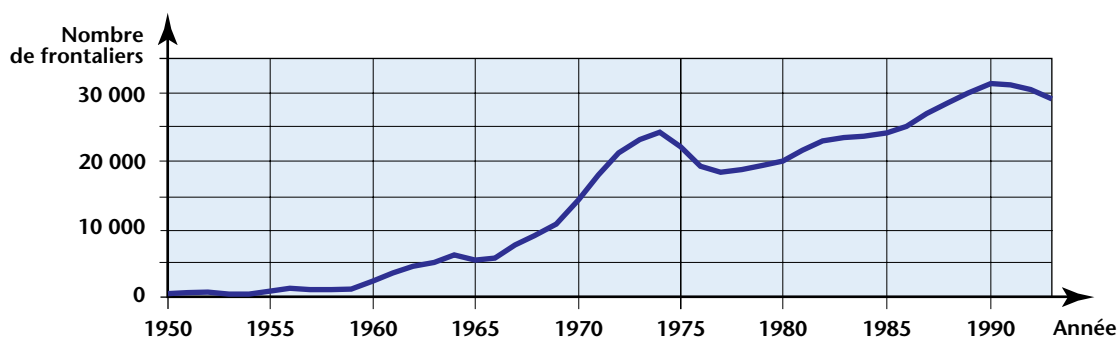


Figure 6.33

Nombre de frontaliers dans le canton de Genève de 1950 à 1993 ¹

Le terme de frontaliers actifs concerne uniquement les travailleurs résidant en France ayant obtenu une autorisation de frontalier pour exercer une activité lucrative en Suisse. Les personnes de nationalité suisse ou binationales ainsi que celles travaillant dans les organisations internationales gouvernementales qui résident en France ne sont donc pas des frontaliers, même s'ils franchissent la frontière pour se rendre sur leur lieu de travail.

Plus de 50% des actifs résidents gessiens travaillent en Suisse (13 650 personnes en 1990) et plus du tiers d'entre eux sont originaires d'une autre région. La population active frontalière du Pays de Gex est surtout constituée d'une main d'œuvre qualifiée, de la classe socio-professionnelle moyenne : ouvriers qualifiés, employés, techniciens. Ils privilégient largement, pour leur installation, un triangle Ferney-Voltaire/Gex/Thoiry.

En période de crise ces emplois sont fragiles, particulièrement les emplois les moins qualifiés, puisque les frontaliers sont souvent les premiers touchés lors de difficultés économiques en Suisse. En période de prospérité, le développement du travail frontalier induit des problèmes dans les entreprises françaises (forte rotation de personnel, pénurie de main-d'œuvre et investissement en formation fort coûteux et peu rentable à cause des départs vers les emplois suisses). En outre, les flux transfrontaliers ont un impact direct en terme d'aménagement de l'espace, puisqu'il revient au Pays de Gex d'assumer le logement, les services, les équipements, les infrastructures et la formation des frontaliers et de leurs familles.

1. D'après : Atlas du bassin genevois, INSEE Rhône-Alpes, OCSTAT Genève, Cartographie et Décision, 1994 ; source statistique : Registre central des étrangers, Genève

6.15.3.2**Activités économiques**

Le Pays de Gex a longtemps gardé la réputation d'une région agricole et touristique. Or la proximité d'un pôle économique et tertiaire tel que Genève a influé sur son évolution tant économique que démographique.

Trois projets importants ont été développés :

- le Technoparc-Pays de Gex à Saint Genis-Pouilly qui vise à accueillir des entreprises à haut niveau technologique sur 40 hectares ; il s'agit là d'un site à gestion intercommunale ;
- la Technopolis du Léman à Thoiry qui est vouée à l'accueil de laboratoires spécialisés dans la recherche appliquée ;
- le Centre d'Affaires Internationales de Ferney-Voltaire qui est à la fois une pépinière d'entreprises exportatrices et la vitrine d'une région.

En termes d'activités, le développement économique a particulièrement favorisé les services (notamment l'immobilier, les services aux entreprises, la restauration, l'hôtellerie), les entreprises de produits intermédiaires et accessoirement les industries.

L'activité commerciale du Pays de Gex est également étroitement liée à la proximité de la frontière suisse. En effet, le pouvoir d'achat de la population française frontalière est plus grand que celui de la population d'un territoire français équivalent (taux de change, salaires suisses, etc.). En outre, la clientèle suisse peut venir consommer des produits à des prix plus intéressants que ceux pratiqués en Suisse, bien que l'inverse soit vrai pour la clientèle française pour certains produits bien spécifiques (par exemple vêtements d'enfants, carburants, etc.).

6.15.4**Poids économique du CERN**

L'université Jean-Moulin/Lyon III a effectué en 1994-1995 une étude de l'impact socio-économique du CERN dans les cantons de Genève et de Vaud et en région Rhône-Alpes (voir Annexe technique n° 10, "Impact économique régional du CERN"). L'objectif de cette étude était d'analyser les effets induits, directs et indirects, de l'activité du CERN, en tenant compte des effets multiplicateurs des revenus distribués. Les effets majeurs du CERN sur la zone d'étude ont en particulier été analysés sous l'angle des commandes et des productions qu'elles génèrent (effet industriel), et sous l'angle des emplois induits par les rémunérations (effet emploi). L'étude est basée sur des données statistiques de 1993 et sur une enquête auprès des 100 premiers fournisseurs régionaux du CERN. Les conclusions de cette étude sont résumées ci-dessous.

Parmi les organisations internationales présentes à Genève, le CERN est sans doute celle qui fait travailler, directement ou indirectement, le plus grand nombre de personnes. En 1993, 7 200 personnes (plein-temps équivalents)

directement liées au CERN vivaient dans la région et y dépensaient une grande partie de leurs revenus. Ces personnes se répartissaient de la manière suivante :

- 3 000 fonctionnaires CERN
- 600 boursiers, étudiants, chercheurs associés rémunérés par le CERN
- 2 400 utilisateurs (plein-temps équivalents), correspondant à 6 000 personnes payées par leurs instituts d'origine et effectuant leurs recherches sur les installations du CERN,
- 1 200 pensionnés du CERN (sur un total de 1 330), qui continuent de résider dans la région. Ils reçoivent leur rémunération de la Caisse de pension du CERN, fonds de capitalisation uniquement alimenté par les cotisations des employés et de l'Organisation.

La figure 6.34 montre les zones de résidence des différentes catégories de personnes directement liées au CERN.

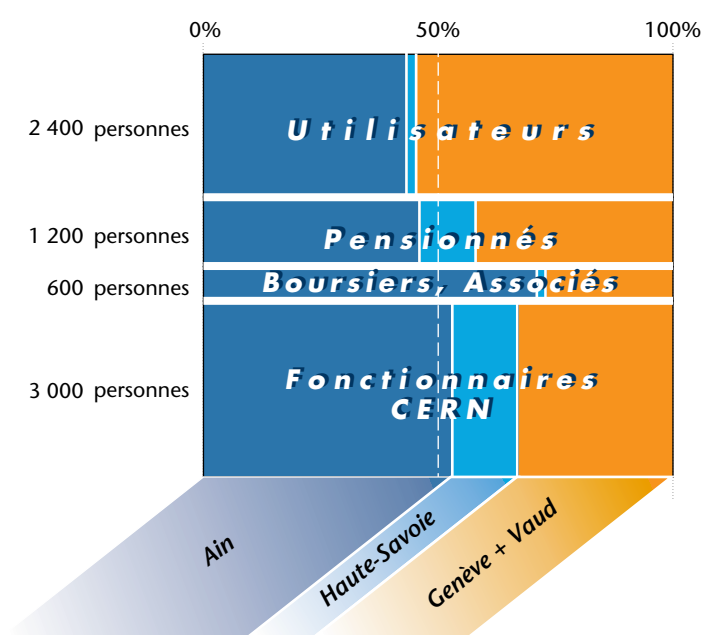


Figure 6.34



Zones de résidence des personnes directement liées au CERN

La somme des rémunérations de l'ensemble de ces 7 200 personnes (plein-temps équivalents) représente 526 millions de francs suisses dépensés en très grande partie localement. A ce montant, il faut ajouter les allocations de l'Organisation pour les dépenses de santé et de scolarité, soit 39 millions de francs suisses. Ce sont donc en tout 565 millions de francs suisses de retombées salariales qui alimentent la vie économique locale, dont 339 millions du côté français et 226 millions du côté suisse.

Les achats du Laboratoire dans la région sont importants à cause d'un effet de proximité incontournable mais aussi du fait de la présence, des deux côtés de la frontière, d'entreprises performantes dans les domaines de la haute technologie concernée. Au total, 1 050 établissements rhône-alpins, genevois et vaudois ont été fournisseurs du CERN en 1993, et les commandes non captives totales (commandes hors électricité et services postaux) ont représenté 179 millions de francs suisses. Avec les commandes captives, ce sont 231 millions de francs suisses dont l'économie régionale a bénéficié à la suite de commandes du CERN. Le tableau 6.9 donne la structure de ces commandes et du nombre de fournisseurs par département.

Tableau 6.9

Commandes régionales du CERN en 1993 en millions de francs suisses

		Services industriels sur le site	Fournitures industrielles	Sous-total	Commandes captives	Total (MCHF)	Nombre de fournisseurs
	Ain	28	7,6	35,6	39	120,6	166
	Haute-Savoie	0,7	6,8	7,5			145
	Isère	6,2	8,8	15			89
	Rhône	8,9	9,1	18			214
	Loire		1,3	1,3			15
	Drôme		3,8	3,8			9
	Savoie		0,4	0,4			166
	Total Rhône-Alpes	43,8	37,8	81,6			669
	Genève et Vaud	26,2	71,4	97,6	13	110,6	378

Les commandes régionales non captives du CERN se répartissent entre Rhône-Alpes et Genève et Vaud avec des pourcentages respectifs de 46% et 54%. La micro-région (Ain et Genève) reçoit à elle seule presque les deux tiers de l'ensemble.

6.15.5

Tourisme

La vocation touristique du Pays de Gex, due à la qualité des paysages et à la présence des reliefs du massif du Jura, se traduit par diverses activités.

Sur le massif du Jura, le tourisme de montagne a suscité l'installation d'équipements pour les sports et loisirs de neige ¹ et les hébergements qui leur sont liés. De nombreuses activités d'été sont également possibles ². La récente création d'une réserve naturelle sur le Haut-Jura favorisera leur développement à moyen terme.

La fréquentation touristique à la journée est importante, notamment pour les sports de neige.

Le tourisme d'affaires et de passage représente une part importante du tourisme dans l'ensemble du Pays de Gex, avec quelques équipements moteurs :

- des grands hôtels pouvant recevoir des séminaires, colloques, etc. (Divonne-les-Bains, Ferney-Voltaire, Gex, Saint Genis-Pouilly) ; la proximité de Genève et de ses organisations internationales, de Palexpo, etc., est pour beaucoup dans une telle demande
- le casino de Divonne-les-Bains (190 machines à sous et jeux traditionnels)
- l'hippodrome de Divonne-les-Bains
- des golfs : Divonne-les-Bains, Echenevex, Saint Jean-de-Gonville (18 trous), Mijoux et Saint Genis-Pouilly (9 trous)
- des plans d'eau : lac à Divonne-les-Bains, plan d'eau à Cessy
- de nombreux hébergements, notamment dans les Unités Touristiques Nouvelles de Mijoux-Lélex, du Col de la Faucille, de la station de Menthières (sur la commune de Chézery-Forens)
- des terrains de camping : Divonne-les-Bains, Gex, Chézery-Forens, Mijoux
- des monuments et sites particuliers, notamment le château de Voltaire à Ferney-Voltaire et le Fort l'Ecluse à Collonges.

Enfin, une partie de l'activité touristique est liée à la proximité de Genève et du lac Léman. Des touristes profitent en effet des hébergements à moindre coût dans les communes gessiennes les plus proches de la frontière pour découvrir cette partie de la Suisse à partir de cette "base arrière".

L'urbanisme et l'aménagement du territoire

6.15.5.1

L'occupation des sols

La figure 6.35 présente les principales zones définies par les plans d'occupation des sols des communes qui s'inscrivent dans le périmètre de l'anneau du LEP.

1. 39 remontées mécaniques pour le ski de piste, 3 télécabines, 50 km de pistes balisées, 200 km de pistes de ski de fond, une école de ski française et une école de ski internationale

2. sentiers de randonnée pédestre, cycliste ou équestre, luge d'été, golfs, école d'escalade, tir à l'arc, tennis, pêche à la truite, etc.

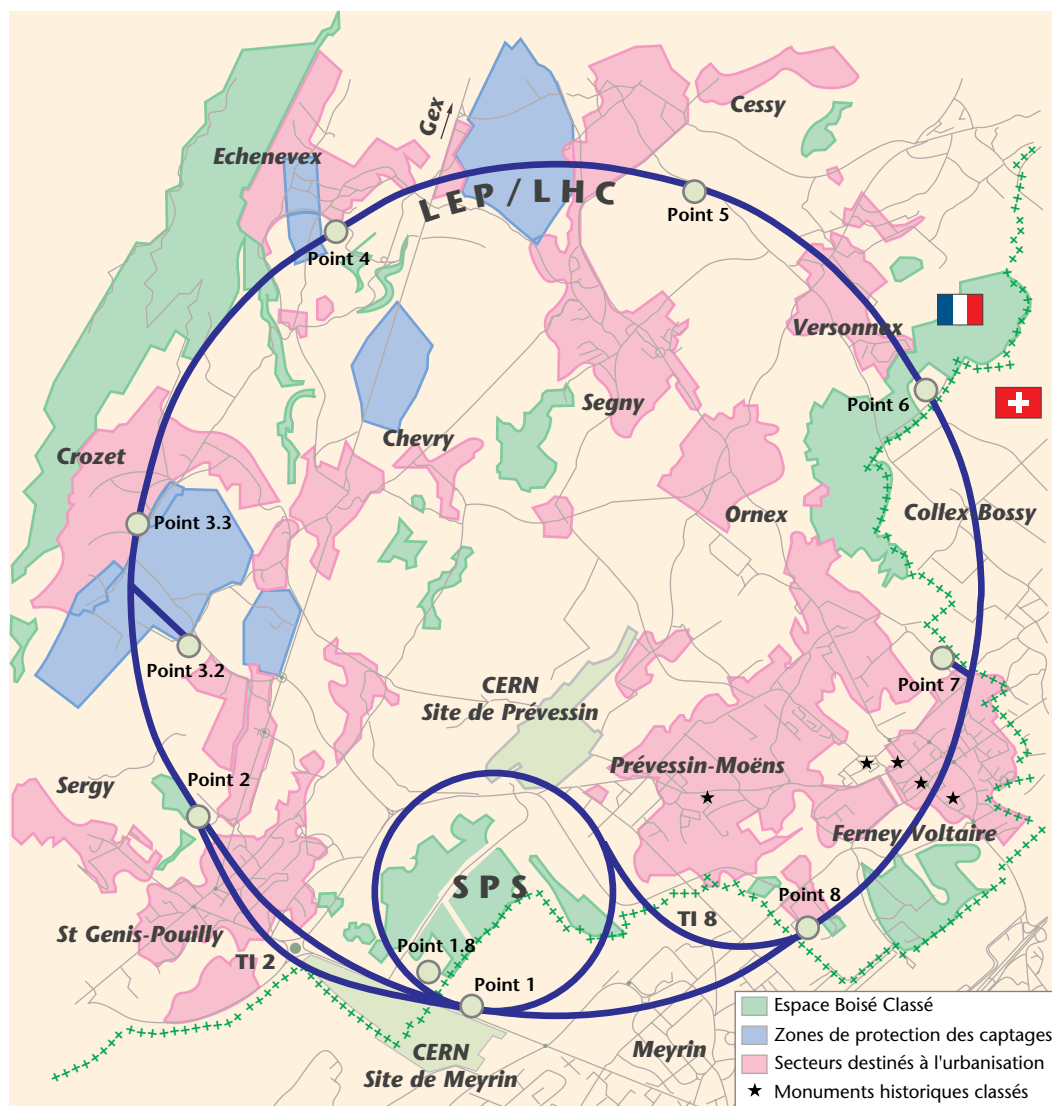


Figure 6.35

Principales zones d'occupation des sols à proximité du LEP

Le Pays de Gex comptait, au 1er septembre 1992 :

- 14 250 hectares de zones NC (richesses agricoles)
- 15 365 hectares de zones ND (richesses naturelles)

Les plans d'occupation des sols autour des différents points concernés par les travaux, accompagnés de la définition des différentes zones commune par commune, sont présentés dans l'Annexe technique n° 7, "Plans d'occupation des sols, acquisitions foncières et servitudes".

6.15.5.2**Réseau routier et trafic**

Les principales routes situées dans la zone du LHC et leur trafic journalier moyen sont illustrés dans la figure 6.36.

Les grands axes de communication du Pays de Gex s'articulent selon des orientations perpendiculaires, l'une longitudinale, l'autre transversale. La première est matérialisée par la liaison Bellegarde/Fort-l'Ecluse/Saint Genis-Pouilly/Gex/Divonne-les-Bains (RN 206/RD 984/RD 984c), et par la voie ferrée SNCF Bellegarde/Divonne-les-Bains. Cette orientation constitue l'axe structurant de la région auquel se raccordent les principales zones urbanisées, à l'exception de Ferney-Voltaire. Cet axe assure également la liaison avec les régions voisines à ses extrémités (Bellegarde et l'autoroute A 40 au sud, le district de Nyon et l'autoroute suisse N 1 au nord).

Un axe routier transversal assure la liaison col de la Faucille/Gex/Ferney-Voltaire (RN 5). Il donne accès aux départements voisins du Jura et du Doubs ainsi qu'à la Vallée de Joux côté Jura, à l'agglomération genevoise (Grand-Saconnex), à l'autoroute suisse N 1 et à l'aéroport de Genève-Cointrin (route douanière) côté lac Léman.

L'axe Saint Genis-Pouilly/Meyrin (RD 984) est le second axe routier transversal du Pays de Gex. Il se situe à une des extrémités du fuseau principal d'urbanisation de l'agglomération transfrontalière genevoise (Annemasse/Genève/Saint Genis-Pouilly). Cet axe assure également l'accès à l'autoroute suisse N 1 de contournement de Genève (demi-jonction de Meyrin et Vernier par la RC 6) et, par conséquent, le raccordement avec le réseau autoroutier français au sud de Genève.

Ces principaux axes sont complétés par une liaison Saint Genis-Pouilly/Ferney-Voltaire (RD 35) entre les deux axes transversaux, fermant ainsi le triangle Saint Genis-Pouilly/Gex/Ferney-Voltaire.

6.15.5.3**Transports publics**

Deux liaisons entre l'agglomération genevoise et le Pays de Gex sont exploitées par les Transports publics genevois (TPG) :

- la ligne F qui relie Ferney-Voltaire à la gare de Cornavin à Genève ; elle offre actuellement 47 courses journalières par sens du lundi au vendredi, soit une cadence de 15 minutes aux heures de pointe du matin et du soir, de 30 minutes le reste de la journée et de 60 minutes le soir ; le service est réduit le samedi et le dimanche
- la ligne Y qui relie Thoiry à Blandonnet dans la banlieue genevoise par Sergy et Saint Genis-Pouilly ; elle offre 23 courses par jour et par sens du lundi au vendredi, soit une cadence de 30 minutes aux heures de pointe et de 60 minutes le reste du temps ; le service est réduit à 15 courses le samedi et à 4 le dimanche.

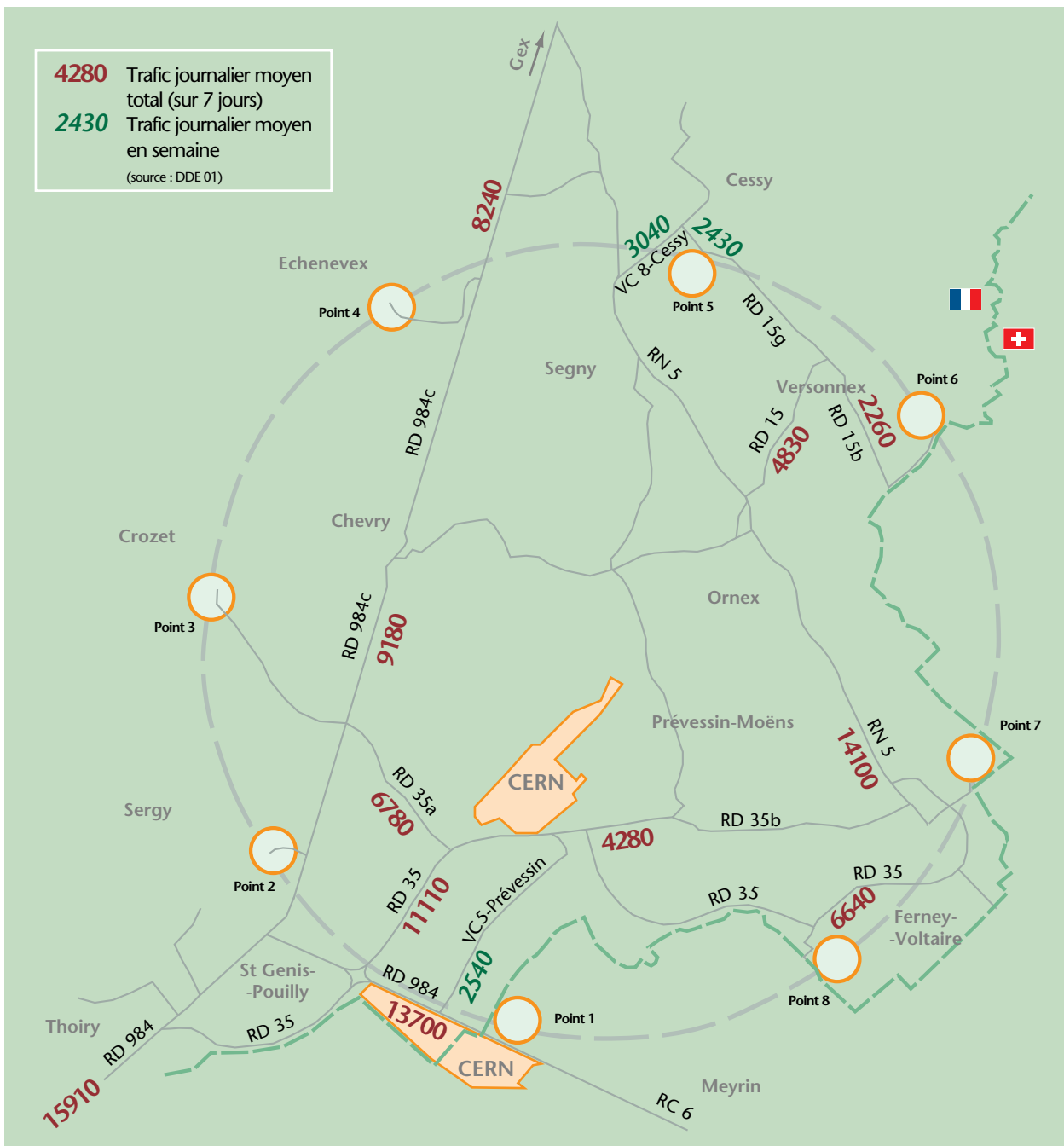


Figure 6.36 Circulation routière : débits journaliers moyens sur une année

6.15.5.4

Transports ferroviaires

Le Pays de Gex ne dispose pas d'une desserte ferroviaire nationale ou internationale pour le transport des personnes. La gare théorique d'accès à ces services est celle de Bellegarde mais la gare de Genève-Cornavin offre un meilleur service international.

La ligne de chemin de fer qui relie Bellegarde et Divonne traverse tout le Pays de Gex et sert au transport de certains matériaux et marchandises (agrégats, carburants, bois, ...). Il est prévu de l'utiliser pour évacuer les ordures ménagères vers la nouvelle usine d'incinération de Bellegarde-Arlod.

6.15.5.5

Transports aériens

Ferney-Voltaire jouit d'un accès direct (guichets, parkings, etc.) à l'aéroport international de Genève-Cointrin. Cet aéroport a connu en 1996 une fréquentation de 6 millions de passagers et un trafic fret de 72 000 tonnes ¹.

Ce sont les décollages par la piste 23 sur la route FRI 7 C qui sont pertinents pour les survols des sites du CERN. Ceux-ci représentaient 9,3% des vols avec instruments totaux en 1996.

Pour le vol à vue, ce sont les vols des avions à hélice qui intéressent principalement les sites concernés par le projet LHC, soit 20 107 mouvements en 1996.

Ces données (répartition des mouvements par secteur et par types de vols de 1991 à 1996, couloirs aériens) sont présentées de manière détaillée dans l'Annexe technique n° 17.

6.15.6

Agriculture et sylviculture

L'agriculture est à la fois un élément important de l'activité économique locale et un facteur essentiel de la qualité de l'environnement et de la qualité de vie des habitants.

L'agriculture du Pays de Gex est présentée ci-dessous en quelques chiffres :

- 369 exploitations avec une surface agricole utile (SAU) moyenne de 36,5 hectares, soit 13 500 hectares au total ; selon le recensement agricole 1988, 56,4% des chefs d'exploitation travaillent à temps complet et 31,2% d'entre eux sont double actifs
- la population agricole familiale représente environ 3,5% de la population totale du Pays de Gex
- les emplois agricoles représentent 4,5% des emplois totaux.

Depuis le redécoupage des nouvelles régions naturelles de l'Ain, le Pays de Gex est divisé en deux zones bien distinctes du point de vue de l'activité agricole :

- La zone forestière : c'est une région montagneuse où se situent les plus hauts sommets du Jura français, à vocation surtout forestière et d'alpages d'altitude. Le boisement représente 75% de la haute chaîne et 29% de la plaine.

1. dont poste : 8 910 t

- La zone agricole et d'élevage : le piémont et la plaine sont classés du point de vue agricole en zone de pâturages. Riches en cultures, grâce à des sols argilo-calcaires, l'élevage bovin (lait et viande) y est particulièrement développé en raison des exportations vers la Suisse.
Il existe également une coopérative agricole à Chevry pour les céréales, une coopérative fruitière à Chézery produisant le "Bleu de Gex" et une coopérative laitière à Mijoux. D'une manière générale, la production laitière du Pays de Gex est vendue à Genève aux "Laiteries Réunies", dont les agriculteurs gessiens sont actionnaires. Quant à la viticulture, le raisin, récolté principalement dans le secteur de Challex, est acheminé en Suisse vers Satigny.

La population agricole est en diminution, comme dans l'ensemble du pays, et les terrains laissés libres par la cessation d'activité de certains exploitants ont parfois du mal à trouver repreneur.

6.15.7

Pêche et pisciculture

Le schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau Rhône - Méditerranée - Corse approuvé par le Préfet de Région le 20 décembre 1996 définit des orientations générales à l'échelle régionale, comme la lutte contre la pollution, la protection des milieux ou la restauration des milieux endommagés. Il ne contient pas d'éléments particuliers concernant directement le secteur de cette étude d'impact.

Parmi les rivières et rus du Pays de Gex, le schéma de vocation piscicole et halieutique ¹ en distingue un certain nombre pour leurs caractéristiques spécifiques en regard de l'environnement, de la faune et de la flore. Il s'agit principalement de la Valserine, l'Annaz, la Versoix, l'Allondon, l'Allemogne, du Lion, du Nant de Prailles, du ru de Ferrière et du ru de Saint Jean.

Le patrimoine piscicole des cours d'eau concernés par l'emprise LEP/LHC est variable. Les classes de qualité selon les normes françaises en vigueur sont les suivantes :

Tableau 6.10

Classes de qualité officielles des cours d'eau en France

1A	excellent, situation normale
1B	bonne, pollution modérée
2	moyenne, pollution nette
3	médiocre, pollution importante
H.C.	hors classe, pollution catastrophique

L'Allondon entre dans la classe de qualité 1A à l'amont de la station d'épuration (STEP) de Saint Genis-Pouilly, H.C. puis 3 à l'aval de la station.

1. Mise à jour 1994

Cette rivière recèle une belle population de truites dans sa partie aval. Des frayères existent entre le pont de la RD 984 à Saint Genis-Pouilly et la Suisse et de fortes potentialités à l'amont du pont ont incité les pêcheurs à se mobiliser sur un projet de passe à poissons au niveau de ce pont dont le seuil n'est pas franchissable actuellement.

L'ombre est présent dans la partie aval mais en régression et sa reproduction naturelle n'est pas certaine. Un barrage (scierie Malivert) n'est pas franchissable par cette espèce.

La présence d'écrevisses à pieds blancs est mentionnée dans les affluents de l'Allondon, notamment le Roulave, le Missezon et le Nant de Praille mais doit être confirmée.

Le Lion entre dans la classe de qualité 1A à l'amont de la station d'épuration de Préveessin. Sa qualité se dégrade à l'aval de la STEP (colmatage par les rejets organiques lors de la traversée de Saint-Genis-Pouilly). Il passe ainsi en classe 3, puis 2. Toutefois, il recèle lui aussi, de même que l'Allondon dont il est affluent, une belle population de truites.

Quant à l'Oudar, il est caractérisé par la classe de qualité 1B entre sa source et le pont SNCF, secteur dans lequel il s'assèche en été. Il passe en classe 2 entre le pont SNCF et le pont de Chauvilly du fait des rejets non traités provenant des carrières de Chauvilly. Il revient en classe 1B à l'aval de la station d'épuration de Versonnex, puis passe en classe 2 de la STEP à la Versoix. Dans ce dernier tronçon, on signale la présence de frayères à truites, dont la qualité est toutefois menacée par les rejets de la station d'épuration.

6.16

Patrimoine

Le pays gessien, zone de transition entre lac et montagne, entre ville et campagne, entre Alpes et Jura, possède une grande richesse de paysages due à l'extrême variété des sites qui l'entourent. Il représente une part importante de l'environnement vert de la métropole genevoise.

Il s'étend largement dans une plaine orientée nord-est/sud-ouest. Il est délimité par la frontière suisse, la chaîne du Jura et le Rhône. La zone de plaine est dominée à l'ouest par la haute chaîne du Jura, dont les contreforts sont forestiers et les sommets occupés principalement par des prairies d'alpage. Lorsque le temps est favorable, il dégage au sud-est une vue magnifique sur les massifs alpins dominés par le Mont-Blanc. Des contreforts du Jura, la vue domine le lac Léman et Genève.

6.16.1**Patrimoine naturel et architectural**

Le Pays de Gex est reconnu pour la qualité de son patrimoine naturel et bâti, puisqu'il compte au total :

- la réserve naturelle de la haute chaîne du Jura
- 35 Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF)
- 1 Zone d'Intérêt Communautaire Ornithologique (ZICO)
- 9 sites naturels classés
- 53 captages d'eau potable, dont 17 ayant fait l'objet d'une Déclaration d'Utilité Publique (DUP)
- 9 230 hectares de forêts soumises au régime forestier
- 10 monuments historiques.

De nombreux périmètres de ces différentes protections se chevauchent.

Par ailleurs, le Service départemental de l'architecture a relevé le caractère particulièrement intéressant d'un certain nombre de centres, de bourgs ou de hameaux, voire de fermes. Il s'agit souvent de noyaux anciens présentant un bâti traditionnel de qualité, participant de l'identité et de l'image du Pays de Gex. Ce bâti est essentiellement constitué de fermes, de maisons d'ouvriers agricoles ou d'artisans, et parfois de maisons plus bourgeoises.

Le Pays de Gex possède quelques sites et constructions protégés au titre de la législation sur les monuments historiques et sur les sites :

- à Ferney-Voltaire, le château de Voltaire
- à Gex, une fontaine datée de 1743 et un lavoir
- à Gex et Mijoux, le col de la Faucille
- à Prévessin-Moëns, l'église et son chœur.

6.16.2**Patrimoine archéologique**

Le Pays de Gex n'est pas une région très explorée ; quelques découvertes archéologiques ont toutefois été effectuées et des sites pouvant présenter un intérêt dans ce domaine ont été répertoriés par des chercheurs ou des Sociétés savantes.

Lors de la construction du LEP, le CERN avait pris contact avec des chercheurs et des experts dans le but de s'assurer qu'aucun de ses ouvrages n'était situé dans une zone à forte potentialité, et de déterminer les secteurs sensibles du point de vue des possibilités archéologiques. Aucun ouvrage de surface du LEP n'a été implanté dans un secteur ayant fait précédemment l'objet de découvertes, ni même où la possibilité d'en faire ait été envisagée.

Les conditions sont les mêmes pour le LHC, qui réutilise en grande partie l'infrastructure du LEP. En ce qui concerne les tunnels de transfert TI 2 et TI 8, leur grande profondeur exclut la traversée d'une couche ayant pu être intéressée par des activités humaines. Les nouveaux puits sont quant à eux tous situés dans des zones ayant déjà fait l'objet de travaux, et où aucune découverte n'a été faite.

Si par un hasard improbable, un chantier de surface se révélait être à l'origine d'une découverte, les autorités compétentes en seraient alors informées, et seraient ainsi à même de prendre les mesures préservatoires qu'elles jugeraient utiles.

7

Effets du LHC sur l'environnement

L'environnement du Pays de Gex est bien connu du CERN depuis la construction du SPS, puis du LEP. Le CERN en a tiré de nombreux enseignements et les applique au nouveau projet.

Les ouvrages du LHC se répartissent en deux grandes familles, selon qu'ils sont en profondeur ou en surface :

- Les principaux ouvrages sont souterrains (tunnels, galeries, halles, etc.) et ont peu d'effets sur l'environnement.
- Les ouvrages de surface sont d'une importance moindre. Ils sont répartis sur les points d'accès de l'anneau. Les bâtiments à construire sont modestes comparés à ceux du LEP, sauf aux Points 1 (Meyrin en Suisse) et 5 (Cessy en France).

Il est important de faire une distinction entre les effets permanents du projet LHC et ceux qui ont une durée limitée à la réalisation des travaux. Il convient enfin de considérer qu'étant donné le grand diamètre de l'anneau du LEP/LHC, les différents chantiers sont éloignés les uns des autres.

Tout comme pour la construction du LEP, le CERN entend réaliser le projet LHC en tenant compte de tous les aspects liés à l'environnement, à la lumière de l'expérience passée.

7.1

Raisons et conséquences du choix du LHC

Les raisons scientifiques du choix du LHC ont été développées au chapitre 1.

La réutilisation de l'infrastructure existante, principalement des sites et du tunnel du LEP, réduit considérablement les effets du projet sur l'environnement mais introduit des contraintes techniques dans la réalisation du projet.

Le tunnel existant est conçu pour permettre la collision des faisceaux en huit points équidistants. Quatre d'entre eux vont recevoir les quatre détecteurs du LHC. Deux de ces détecteurs peuvent être directement installés dans les halles souterraines existantes situées aux Points 2 et 8, leurs dimensions sont suffisantes. Les deux autres détecteurs du LHC nécessitent la construction de nouvelles halles souterraines de grandes dimensions.

Cette construction n'est possible qu'aux Points 1, 3, 5 et 7¹. Pour des raisons géologiques, le Point 1 a été retenu et le Point 3 exclu. Pour implanter le deuxième grand détecteur, le Point 5 a finalement été choisi de préférence au Point 7 en raison de sa position symétrique par rapport au Point 1.

Cette symétrie assure en effet un fonctionnement plus performant de l'accélérateur. Les reconnaissances géologiques effectuées au Point 5 confirment la possibilité de l'implantation de la grande salle d'expérimentation.

La position des bâtiments de surface est influencée quant à elle par l'emplacement des halles souterraines et la direction du tunnel.

7.2

Méthodologie pour l'évaluation des impacts

L'étude d'impact est réalisée conformément :

- aux textes généraux relatifs à la prise en compte de l'environnement et à l'élaboration des études d'impacts (loi du 10 juillet 1976 et décrets des 12 octobre 1977 et 25 février 1993),
- aux textes législatifs et réglementaires spécifiques en vigueur à la date de la réalisation des dossiers (loi sur l'eau, loi sur le bruit, etc.).

7.2.1

Priorité à la concertation

Le LHC, en tant que prolongement naturel du LEP, bénéficie des efforts réalisés au cours de la construction et de l'exploitation de ce dernier pour l'intégrer dans sa région d'accueil. Cette intégration doit beaucoup à l'existence d'une "Structure de concertation" mise en place au début du projet LEP et maintenue

1. Pour mémoire, les halles d'expérimentation du LEP occupent les Points 2, 4, 6 et 8.

active depuis. La Structure de concertation est présidée par monsieur le Sous-préfet de Gex et réunit les maires et les conseillers généraux directement concernés, les représentants des services départementaux de l'Etat, le chef du projet et un autre membre du directoire du CERN. La fréquence semestrielle des réunions augmente si besoin est et devient trimestrielle pendant la phase active des chantiers. Cette structure ad hoc, qui permet une communication ouverte et un dialogue constructif entre les différents partenaires, s'est déjà réunie quatre fois pour prendre connaissance et discuter du projet LHC.

Les préoccupations d'environnement accompagnant chaque phase de réalisation des études ainsi que le dialogue permanent avec les communes concernées et les services de l'Etat ont abouti à des solutions qui préservent les conditions de vie des riverains. Des solutions de proximité ont été trouvées pour le dépôt des déblais, évitant aux camions d'emprunter le réseau routier public. Le bâtiment le plus voyant a été réorienté et éloigné des habitations les plus proches, et sa hauteur sera considérablement réduite en phase d'exploitation afin que son impact visuel soit limité.

7.2.2

Méthodes d'analyse des impacts

L'évaluation des divers impacts est basée, soit sur des modèles de calcul spécialisés, soit sur des mesures directes. Selon la nature de l'impact, il a été fait appel à des organismes spécialisés.

7.2.2.1

Impact radiologique

Le groupe de radioprotection du CERN travaille en étroite liaison avec les organismes officiels de radioprotection français et suisses. Il utilise le programme FLUKA pour les études de blindage des accélérateurs et le calcul de la radioactivité induite. La modélisation de la physique, qui est à la base du programme, est régulièrement mise à jour et le programme est continuellement soumis à des vérifications expérimentales. L'Annexe technique n° 5, "Impact radiologique du LHC sur l'environnement" donne les détails des calculs et des résultats, ainsi qu'une bibliographie complète des publications scientifiques y afférant. Le programme FLUKA a fait l'objet d'une présentation au congrès organisé en novembre 1996 à Saclay par la Section de protection technique de la Société française de radioprotection, sur le thème "Utilisation des codes de calcul en radioprotection". L'Annexe technique n° 11, "Utilisation du programme de simulation FLUKA pour les calculs radiologiques" reprend la présentation faite par le CERN lors de ce congrès.

7.2.2.2

Impact sur les ressources en eau

Des reconnaissances géologiques systématiques ont été réalisées au droit de tous les ouvrages souterrains par le biais de 41 sondages. Là où les ouvrages traversent des nappes phréatiques ou s'en approchent, des sondages multiples ont été effectués.

Pour le tunnel de transfert TI 2, qui passe sous le sillon de Saint Genis-Pouilly, la détermination précise du profil du toit de la molasse a entraîné l'abaissement de 20 m du tunnel afin d'éviter tout risque d'interférence avec la nappe souterraine.

Au Point 5, douze sondages ont permis de mesurer la direction et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines. Ces campagnes de mesures hydrogéologiques ont été menées sous la direction d'experts extérieurs (voir liste des contributions extérieures en fin de volume). Il en est de même pour les analyses géotechniques nécessaires afin de définir les méthodes d'exécution des travaux. Les Annexes techniques n^{os} 3 et 4 donnent les détails des méthodes utilisées et des résultats obtenus.

7.2.2.3

Impact sur les rejets d'eau et d'air

La qualité des eaux rejetées dans les rivières et les nants ne subit pas de changement par rapport à la situation actuelle, qui est satisfaisante (voir chapitre 6).

La qualité de l'air rejeté dans l'atmosphère par le système de ventilation du tunnel et par les aéroréfrigérants ne subit pas de changement par rapport à la situation actuelle, qui est satisfaisante (voir chapitre 6).

Le niveau extrêmement faible de radioactivité induite a été calculé selon les méthodes décrites à l'Annexe technique n^o 5, "Impact radiologique du LHC sur l'environnement".

7.2.2.4

Impact sur les niveaux sonores

Le LHC réutilise toutes les installations du LEP dont le niveau sonore actuel est conforme à la législation ¹. Sur les sites, le LHC n'induit pas de bruit supplémentaire. Aux Points 1 et 5 où d'importantes nouvelles constructions sont prévues, la conception des bâtiments bénéficie de l'expérience acquise par le LEP et des solutions qui permettent de confiner le bruit émis par les installations bruyantes (voir Annexe technique n^o 6, "Mesures des niveaux sonores autour de l'anneau du LEP").

7.2.2.5

Impact visuel

L'impact visuel des nouvelles constructions a été étudié par des images de synthèse, grâce auxquelles l'aspect futur des sites peut être comparé avec leur aspect actuel. La réalité virtuelle a par ailleurs été utilisée pour permettre une approche complète puisque les bâtiments peuvent être visualisés dans leur environnement à partir de n'importe quel point.

7.2.2.6

Impact sur le trafic routier

Le trafic routier est important uniquement pendant la période des travaux.

1. voir Annexe technique n^o 6, "Mesures des niveaux sonores autour de l'anneau du LEP"

Pour son évaluation, l'ensemble des opérations à effectuer a été décomposé en unités de transport pour toutes les sections des routes empruntées, en fonction du planning technique. Les résultats détaillés sont montrés à l'Annexe technique n° 12, "Trafic routier sur les différents axes pendant les travaux de construction et d'installation du LHC".

Les solutions de proximité choisies pour les dépôts des déblais en accord avec les communes concernées réduisent les transports qui traversent des zones habitées à moins de 5% du volume total des déblais.

7.2.2.7

Impact sur la faune et la flore

Pour évaluer l'impact du projet sur la faune et la flore et les mesures compensatoires à prendre, il a été fait appel à un botaniste local réputé et aux lieutenants de louveterie responsables du secteur (Annexe technique n° 13, "Sites de dépôt des déblais : rapport d'expertise floristique").

Les études d'aménagements paysagers des sites de dépôt ont été réalisées par à un bureau d'architectes et les études hydrauliques à un bureau d'ingénieurs (Annexe technique n° 8, "Aménagements paysager et hydraulique de la zone de dépôt des déblais de Cessy").

7.2.3

Difficultés rencontrées

La nature évolutive d'un grand projet scientifique international et sa situation à cheval sur la frontière franco-suisse entraînent quelques complications par rapport à un projet plus conventionnel.

La définition des ouvrages et leur implantation peut évoluer en fonction de l'avancement des études scientifiques et techniques. La configuration de certaines expériences n'est pas encore approuvée. Des options de développements futurs après la mise en exploitation en 2005 sont à préserver. L'étude d'impact tient compte de ces paramètres, c'est la raison pour laquelle elle ne peut pas être finalisée très en amont du début des travaux.

La situation particulière du projet implanté à la fois en France et en Suisse entraîne une présentation transnationale de l'étude d'impact. Les services techniques du CERN collaborent aussi bien avec les services techniques du canton de Genève ou de la Confédération helvétique qu'avec les services de l'Etat français, c'est pourquoi certaines mesures concernant l'environnement tirent leur origine de statistiques suisses.

Le coût des mesures prises pour réduire les conséquences du projet sur l'environnement ne peut pas toujours être identifié sans ambiguïté. Si le coût des travaux ou aménagements spécifiques est facile à identifier, il n'en est pas de même lorsque la conception initiale des constructions incorpore déjà les aménagements indispensables pour la protection du voisinage et de l'environnement.

7.3

Phase de construction : les chantiers

7.3.1

Les chantiers souterrains

Si par essence les ouvrages souterrains n'ont que peu d'impact sur l'environnement, leur réalisation nécessite cependant des précautions pour réduire ou éviter les éventuelles nuisances liées à l'évacuation des déblais, à la traversée de nappes aquifères, aux rejets d'eau en surface, aux ébranlements et aux bruits issus du chantier.

Les déblais ne sont transportés que de jour pour éviter les nuisances sonores nocturnes.

Seul le creusement du puits du Point 5 conduira à la traversée de nappes aquifères. Pour protéger ces nappes et travailler au sec, on utilise soit la technique de la congélation (voir figure 5.2 à la page 141) soit celle de la paroi moulée (voir figure 5.3 à la page 142). Pendant la durée des travaux, les emplacements de deux des sondages géotechniques préalables sont utilisés pour installer des instruments de mesure permettant de contrôler régulièrement la qualité des eaux souterraines en aval et en amont du chantier, et de déceler immédiatement toute trace de pollution éventuelle pouvant être causée par les travaux.

Les eaux évacuées en surface qui pourraient contenir des laitances de béton sont décantées avant leur rejet.

L'emploi des explosifs est limité, adapté à la situation locale et strictement contrôlé (voir paragraphe 5.1.5.3 à la page 143). Les problèmes de bruit et d'ébranlements, liés à l'emploi d'explosifs lors de l'excavation de certains puits (jusqu'à 10 m de diamètre), sont parfaitement maîtrisés par le CERN. Les plans de tirs sont adaptés afin d'éviter tout dégât, et les tirs sont interdits la nuit, sauf cas de force majeure lié à la sécurité.

Les installations provisoires de ventilation du chantier souterrain sont insonorisées. Elles peuvent, si nécessaire, être placées derrière un mur antibruit pour réduire encore le bruit perceptible.

7.3.2

Les chantiers de surface

Les chantiers visibles en surface sont principalement nécessaires à la réalisation des travaux souterrains (percement des puits, excavation des halles), et à la construction de bâtiments.

Des mesures sont prévues pour atténuer les nuisances dues à ces chantiers, particulièrement pour ceux d'entre eux qui sont situés à proximité de secteurs urbanisés. Ces mesures sont les suivantes :

- Dans la mesure du possible, les premiers déblais extraits servent à créer des merlons pour isoler autant que possible les chantiers du voisinage.

- En cas d'utilisation des explosifs, le CERN ferait procéder, sur les indications d'un laboratoire-conseil spécialisé et en accord avec les propriétaires, à des constats préalables ¹ sur les constructions existantes les plus proches des sites concernés.
- Il n'y a pas de circulation nocturne de camions sur les routes. Les déblais extraits des principaux sites (Points 1, 5 et 6) sont déposés à proximité des chantiers et n'empruntent pas le réseau routier public, sur lequel ne sont transportés que les faibles volumes extraits des autres sites.
- Lorsque des camions doivent emprunter le réseau routier public, des décrotteurs de roues et des zones de lavage sont mis en place dès le début des travaux à la sortie des chantiers (voir chapitre 8).
- Des clôtures anti-bruit sont prévues pour les éventuelles installations source de bruit (centrales à béton, compresseurs, etc.)
- Des bassins de rétention et de décantation pour les eaux de chantier sont installés.
- Des déchetteries de chantier sont mises en place.

7.4

Phase d'exploitation : les ouvrages terminés

7.4.1

Les ouvrages souterrains

Les ouvrages souterrains, une fois achevés, ne sont plus source de nuisances. La plupart de leurs installations sont silencieuses et pour les autres, le bruit qu'elles émettent est imperceptible en surface.

7.4.2

Les ouvrages de surface

Les ouvrages de surface comportent :

- Les bâtiments de type industriel nécessaires au montage ou abritant les salles de contrôle, des équipements électriques, cryogéniques, de ventilation, etc. Ces bâtiments sont construits et isolés en fonction des activités qu'ils abritent.
Leur construction respecte les contraintes de protection de l'environnement en matière de bruit et de sécurité vis-à-vis des tiers.
- Les aires destinées aux réservoirs de grande capacité pour le stockage de l'hélium.

L'impact sur l'environnement est très faible sur tous les sites, sauf ceux de Cessy en France et de Meyrin en Suisse. Les nouvelles installations s'intègrent à

1. En France, le CERN ferait appel aux experts du CETE ; en Suisse, des huissiers judiciaires dresseraient des constats.

l'ensemble de celles qui existent déjà et profitent des aménagements paysagers réalisés lors de la création du LEP.

Pour les Points 1 (Meyrin) et 5 (Cessy), qui se situent en plaine et dont les futures installations sont importantes, tous les aménagements pouvant atténuer l'impact sur l'environnement sont mis en œuvre (choix des matériaux, des couleurs, des formes, de la végétation, aménagements paysagers, isolation phonique, etc.).

Les solutions proposées s'appuient sur l'expérience acquise grâce au LEP. D'une manière générale, un soin particulier est apporté à :

- la limitation des nuisances sonores,
- l'obtention d'un haut niveau de sécurité pour les bâtiments présentant un risque (stockage de gaz par exemple),
- la limitation de l'impact visuel (par exemple, une fois le montage de l'expérience terminé, la hauteur du bâtiment de montage du Point 5 à Cessy est abaissée et passe de 23 m à 16 m en phase d'exploitation),
- la prise en compte de l'environnement existant (nature du bâti proche, végétation, topographie des lieux, cheminements piétonniers, voirie etc.).

7.5

Impact visuel

7.5.1

Aspect visuel des ouvrages de surface

L'aspect des bâtiments de surface est un souci majeur sur chaque site. L'impact visuel global du projet LHC est faible, car, d'une part les sites sont éloignés les uns des autres, et d'autre part, pour la majorité d'entre eux, les ajouts à l'existant sont peu importants.

De plus, les sites bénéficient des aménagements réalisés lors de la construction du LEP (plantations, mouvements de terre, décaissement, etc.) et la hauteur des futurs bâtiments est toujours inférieure à celle du plus haut bâtiment existant, sauf pour le Point 1 et le Point 5.

Ainsi, sur l'ensemble des sites devant recevoir de nouveaux bâtiments ou des aires de stockage, seuls ceux des Points 1 (Meyrin) et 5 (Cessy) sont profondément modifiés par rapport à leur aspect actuel.

Les nouvelles constructions sont présentées au chapitre 4.

Les pages qui suivent illustrent l'impact visuel des nouveaux bâtiments pour l'ensemble des Points concernés par les travaux. Des images de synthèse permettent de comparer l'aspect actuel et l'aspect futur.

7.5.1.1

Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 1.8 (Prévessin-Moëns)

Le choix de l'implantation de l'aire de stockage d'hélium a été fait en fonction des réseaux enterrés existants.

Cette zone est en grande partie entourée par une forêt qui forme une bonne protection visuelle, complétée par un habillage végétal du côté de la route RD 984 (route de Meyrin à Saint Genis-Pouilly).



Figure 7.1

Vue du Point 1.8 actuel côté Meyrin

D'autres solutions techniques basées sur la liquéfaction de l'hélium sont à l'étude. Elles permettraient de réduire considérablement le nombre de réservoirs nécessaires.



Figure 7.2

Vue du Point 1.8 côté Meyrin après construction de l'aire de stockage

Le bâtiment SMA est destiné à l'assemblage final des aimants de l'accélérateur.

Il est situé à proximité du hall existant SM 18 dans lequel sont effectués les tests de réception et les mesures magnétiques de ces aimants.

Il est relié à ce dernier par un abri de déchargement SMB.



Figure 7.3

Vue du Point 1.8 actuel côté Jura

Les halls SMA et SMB sont traités d'une manière identique aux bâtiments existants qui les entourent, c'est-à-dire avec des bardages métalliques dans les mêmes tons.



Figure 7.4

Vue après construction du bâtiment SMA

7.5.1.2

Aspect visuel des nouvelles constructions pour le PMI 2

L'orientation des halles SMI 2 et SDI 2 est imposée par l'emplacement du puits PMI 2 servant à descendre les aimants de courbure dans le tunnel de l'accélérateur.

En effet, le bâtiment SMI 2 sert au stockage provisoire des aimants avant leur installation dans le tunnel, une fois les essais de réception et les me-sures magnétiques effectués.



Figure 7.5

Vue actuelle du site de Meyrin depuis le rond-point de Saint Genis-Pouilly

Ces bâtiments, construits à l'intérieur du site de Meyrin, sont situés à proximité immédiate de grands bâtiments d'expérimentation existants.

Leurs façades sont constituées de bardages métalliques dont les tons s'harmonisent avec les couleurs des bâtiments voisins et ils sont partiellement isolés de la route RD 984 par un rideau d'arbres.



Figure 7.6

Vue après construction des bâtiments SDI et SMI 2

7.5.1.3**Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 2 (Sergy)**

Une aire de stockage d'hélium est nécessaire. Son positionnement a été choisi en tenant compte des impératifs techniques, mais aussi dans le but de rendre ce stockage le moins visible possible.

Les bâtiments existants et la végétation sont utilisés comme écran visuel.

Actuellement, ce site est presque entièrement caché à la vue par des bois et des merlons arborisés. Son aspect général n'est pas modifié.

**Figure 7.7****Vue du Point 2 actuel, côté Saint Genis-Pouilly**

7.5.1.4**Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 3.2 (Crozet)**

Les nouvelles installations se limitent à une aire de stockage d'hélium.

Sa position a été choisie pour qu'elle soit dissimulée par les bâtiments et la végétation existants, tout en restant en dehors de l'axe de la ligne électrique ayant entraîné un déboisement partiel dans cette direction.

L'aspect du site n'est pas modifié.

**Figure 7.8****Vue du Point 3.2 actuel, côté Jura**

7.5.1.5

Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 3.3 (Crozet)



Figure 7.9

Vue du Point 3.3 actuel

Sur ce site situé dans le village de Crozet, il est prévu de réaliser un bâtiment de même facture que le bâtiment actuel (volumétrie, toiture avec couverture en tuiles, nature des matériaux de façade, ouvertures, etc., qui s'harmonise avec le bâti environnant.



Figure 7.10

Vue du Point 3.3 après construction du nouveau bâtiment

7.5.1.6

Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 4 (Echenevex)

La topographie particulière du site, décaissé de 10 m, rend les constructions peu visibles depuis le village, même si elles sont apparentes depuis la route d'accès.



Figure 7.11

Vue du Point 4 actuel

Les matériaux, les formes et les couleurs des nouveaux bâtiments sont en accord avec ceux des bâtiments existants.



Figure 7.12

Vue du Point 4 après construction des nouveaux bâtiments

7.5.1.7

Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 5 (Cessy)

Ce site est situé en plaine et dans un environnement peu boisé. Sa relation avec l'environnement est donc délicate.

En effet, il n'est pas réaliste d'espérer faire disparaître entièrement les installations derrière un rideau d'arbres ou derrière des mouvements de terrain importants, qui créeraient un paysage artificiel peu adapté aux caractéristiques de ce lieu.



Figure 7.13

Vue du Point 5 actuel côté village

La prise en compte de l'ensemble de ces contraintes doit aboutir à la création d'un paysage intégrant non seulement les bâtiments mais aussi les aménagements du secteur (voirie, cheminements piétonniers, végétation, etc.).

Compte tenu de l'importance et de la durée des travaux, une évolution du site en deux phases est prévue afin de réduire à terme l'impact visuel. La phase 1 correspond à la phase de montage



Figure 7.14

Vue du Point 5 côté village après construction des nouveaux bâtiments : phase 1

Afin d'intégrer les nouvelles constructions dans le paysage, l'orientation des bâtiments, leur forme, le choix des matériaux et de leur couleur, sont soigneusement étudiés.



Figure 7.15

Vue du Point 5 côté village : de la phase 1 ...

En phase finale, la hauteur du bâtiment principal est réduite de 7 mètres et sa longueur ramenée à 102 mètres.



Figure 7.16

Vue du Point 5 côté village : ... à la phase 2

Les figures 7.17 à 7.20 montrent les mêmes ouvrages que les figures 7.13 à 7.16 depuis un point de vue différent.



Figure 7.17

Vue du Point 5 actuel côté RD 15g

Une partie des déblais est utilisée pour aménager des plates-formes paysagères.

Ces plates-formes ne figurent pas sur les montages afin de permettre une meilleure vision de l'aspect des bâtiments, qu'elles masqueront en partie.



Figure 7.18

Vue du Point 5 côté RD 15g après construction des nouveaux bâtiments : phase 1



Figure 7.19

Vue du Point 5 côté RD 15g : de la phase 1 ...

Les abords des bâtiments sont traités avec soin (engazonnement, plantations d'arbres sur les zones de stationnement et en bordure de la voirie interne, ...).

La réfection des chemins agricoles existants ainsi que la création d'un chemin piétonnier longeant les haies en périphérie du site contribuent à la mise en valeur générale du secteur.



Figure 7.20

Vue du Point 5 côté RD 15g : ... à la phase 2

7.5.1.8

Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 6 (Versonnex)

Deux bâtiments existants sont prolongés pour abriter les installations cryogéniques.

Une aire de stockage d'hélium complète les nouvelles constructions.



Figure 7.21

Vue du Point 6 actuel

Les nouveaux bâtiments sont quasiment invisibles de l'extérieur du site car masqués par les constructions existantes ou par les arbres de la forêt voisine.

Les abords des bâtiments en phase finale sont traités avec soin (engazonnement, plantations d'arbres sur les zones de stationnement et en bordure de la voirie interne).



Figure 7.22

Vue du Point 6 après construction des nouveaux bâtiments

7.5.1.9**Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 7.1 (Ornex)**

Les installations complémentaires pour ce site se limitent à la construction d'une aire de stockage d'hélium. Le site se situe à proximité d'une zone urbaine (lycée et collège de Ferney-Voltaire, immeubles de logements). La position de cette aire a été choisie pour atténuer son impact visuel en utilisant au mieux l'écran formé par la végétation et les bâtiments existants.

L'aspect du site n'est pas modifié.

**Figure 7.23****Vue du Point 7.1, côté lycée international de Ferney-Voltaire**

7.5.1.10**Aspect visuel du Point 7.2 (Collex-Bossy)**

Si construction il y avait, elle aurait la dimension d'une grande villa (300 m²) et coifferait le puits d'accès.

Son architecture s'harmoniserait avec le bâti local, comme c'est le cas pour le bâtiment du Point 3.3 à Crozet.

Elle ne serait pas visible depuis le village car masquée par le bosquet.

**Figure 7.24****Vue du Point 7.2**

7.5.1.11

Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 8 (Ferney-Voltaire)

Les bâtiments existants ne sont réellement visibles que depuis l'aéroport de Genève-Cointrin.

**Figure 7.25****Vue du Point 8 actuel depuis l'aéroport de Genève-Cointrin**

Les nouveaux bâtiments sont construits au centre du site actuel. Ils sont réalisés en harmonie avec l'existant.

**Figure 7.26****Vue du Point 8 après construction des nouveaux bâtiments**

7.5.1.12

Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 1 (Meyrin)

Les nouvelles constructions du Point 1 sont situées sur le territoire de la Commune de Meyrin, à Maisonnex-Dessus.

Elles sont disposées autour des constructions existantes du LEP, au nord de la route reliant Meyrin à Saint Genis-Pouilly.



Figure 7.27

Vue du Point 1 actuel (Suisse) côté Meyrin

La façade du grand bâtiment coiffant les puits d'accès est revêtue de lames de bois. Sa toiture constituée de trois plans successifs légèrement inclinés coupe l'effet de longueur.

Le bâtiment de la salle de commande est entièrement vitré. Divers aménagements paysagers viennent compléter l'ensemble bâti. Une butte arborisée viendra par exemple isoler le Point 1 de la ferme voisine.



Figure 7.28

Vue du Point 1 après construction des nouveaux bâtiments

7.5.2

Les nouvelles lignes électriques

Le réseau électrique à haute et moyenne tension construit pour le projet LEP, qui était lui-même une extension du réseau développé pour l'accélérateur SPS à partir du réseau 400 kV d'EDF, est réutilisé dans son intégralité.

Seules deux nouvelles lignes sont nécessaires pour renforcer l'alimentation électrique des Points 1 et 5. Comme par le passé, ces lignes sont enterrées sur toute leur longueur selon les principes décrits au chapitre 4 (paragraphe 4.3 à la page 132. Passée la période des travaux, l'impact sur l'environnement est donc nul. La photographie de la figure 7.29 met en évidence l'absence d'impact visuel d'une des lignes 66 kV enterrées du LEP.



Figure 7.29

Ligne 66 kV enterrée dans l'accotement de la route d'accès au Point 6 (Versonnex)

7.5.3

Les chantiers annexes

Sous ce terme, on regroupe les travaux de voirie et réseaux divers ¹ qui accompagnent nécessairement le projet. L'impact de tels chantiers est strictement limité dans le temps.

En fait, les travaux annexes sur les réseaux sont limités aux amenées d'eau potable aux bâtiments du Point 5 à Cessy par des canalisations de diamètre approprié, ainsi qu'aux conduites de rejet des eaux pluviales et usées. Les autres bâtiments, situés sur des zones LEP existantes, sont connectés aux réseaux

1. hors réseau électrique

d'alimentation et d'évacuation déjà en place. Tous ces réseaux sont enterrés ; les réseaux d'autres natures transitent tous par le tunnel du LEP.

7.6

Impact radiologique

Les conclusions principales concernant l'impact radiologique du LHC sur l'environnement se résument comme suit :

- les débits de doses en surface, issus des rayonnements directs résultant du fonctionnement du collisionneur, restent négligeables et très inférieurs aux normes en vigueur ;
- la radioactivité rejetée dans l'environnement par l'air et par l'eau est insignifiante et, dans tous les cas, reste en dessous des limites fixées par la législation ;
- la radioactivité induite dans la roche autour du tunnel est négligeable.

En fait, l'impact radiologique du LHC dans les deux pays-hôtes du CERN est inférieur aux limites légales ¹ et maintenu au niveau le plus bas qu'on puisse raisonnablement atteindre (principe *ALARA* ²).

L'étude détaillée de l'impact radiologique du LHC est présentée en annexe (voir Annexe technique n° 5, "Impact radiologique du LHC sur l'environnement").

7.6.1

Les sources de rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont produits par les protons de haute énergie qui interagissent en collision au cœur des quatre expériences, ou avec la matière constituant certains éléments de l'accélérateur, par exemple les arrêts de faisceaux.

Après l'interaction des protons, les cascades hadroniques, engendrées par des pions, sont le processus dominant dans la propagation du rayonnement ionisant et la production de radioactivité induite dans la matière. Elles sont générées par des hadrons de haute énergie, qui produisent d'autres particules de cascade en interaction avec les noyaux de la matière.

Ces interactions induisent une radioactivité rémanente dans les structures autour du LHC, qui subsiste quand la machine est arrêtée, tandis qu'elle est quasi inexistante dans le cas du LEP, qui fonctionne avec des électrons et des positons.

1. M. Höfert, L. Moritz et G.R. Stevenson, Impact radiologique du projet LHC sur l'environnement, CERN/TIS-RP/97-06 (1997).

2. De l'anglais *As Low As Reasonably Achievable*

Des muons sont produits directement ou par la désintégration des mésons π (pions) et k (kaons) de la cascade hadronique. Ces muons, qui par ailleurs constituent une partie importante du rayonnement cosmique reçu sur la terre, sont absorbés dans la roche au niveau du tunnel. Ils ne produisent pratiquement pas d'interactions nucléaires et, en conséquence, n'induisent pas de radioactivité dans la matière (roche, terre, eau) qu'ils rencontrent.

7.6.2

Les normes de radioprotection

Les normes de radioprotection actuellement en vigueur au CERN (tableau 7.1) sont plus strictes que celles qui sont actuellement en vigueur en France et que celles de la recommandation de base de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), publiée sous le nom de Recommandation 60¹. La Suisse a introduit les normes préconisées par cette recommandation dans son Ordonnance sur la radioprotection de 1994.

La dose de référence de 15 mSv/an, appliquée au CERN pour les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants dans l'exercice de leur profession depuis déjà plus de 10 ans, est encore plus stricte que la nouvelle limitation de la dose efficace individuelle dans la Recommandation 60, qui est de 20 mSv/an (valeur moyenne répartie sur une période de 5 ans. La dose annuelle est toutefois limitée à 50 mSv).

La dose efficace annuelle maximale pour les individus du public à l'extérieur des sites recommandée par la CIPR 60 est de 1 mSv/an. Le CERN garantit que l'exposition de la population à l'extérieur de ses sites reste en dessous d'une dose efficace de 0,3 mSv par an, limite qui est appliquée en Suisse, et qui est donc 3 fois inférieure à celle proposée par la CIPR.

Toutes les limites de dose citées ci-dessus ne tiennent pas compte de l'exposition externe provenant de sources naturelles, qui est de l'ordre de 1 mSv par an dans le bassin lémanique.

Pour assurer que la limite de 0,3 mSv n'est pas dépassée, il faut contrôler les rayonnements diffusés et les rejets dus au fonctionnement des installations du CERN. En ce qui concerne la radioactivité des effluents dans l'air et l'eau, le CERN prend en compte des valeurs de référence calculées et exprimées en becquerels. Pour chaque catégorie de radionucléides, ces valeurs présentent une dose efficace aux personnes critiques du public de 0,2 mSv par an. La comparaison entre les activités calculées et les valeurs de référence, toutes deux exprimées en becquerels, permet de connaître, pour chaque radionucléide produit, le niveau de radioactivité par rapport à la dose de 0,2 mSv par an. On trouve en annexe une analyse détaillée des impacts radiologiques du LHC².

1. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, Annals of the ICRP 21,4 (1991)

2. Voir Annexe technique n° 5, "Impact radiologique du LHC sur l'environnement"

Tableau 7.1

Normes de radioprotection du CERN et de la CIPR

Normes de radioprotection (mSv)	Limite annuelle CERN	Limite annuelle CIPR
Personnes sous contrôle individuel	15	20
Dose aux individus à l'extérieur du CERN	0,3	1
Exposition par les rejets aériens radioactifs	0,2 ^a	
Exposition par les rejets liquides radioactifs	0,2 ^a	

a. La somme de ces deux expositions doit toutefois rester en dessous d'une dose efficace de 0,2 mSv par an.

Tableau 7.2

Valeurs de référence de rejets radioactifs annuels par la voie aérienne

Valeurs de référence exprimées en GBq par an	
Tritium (³H) ^a	10 000 000
Béryllium 7 (⁷Be) ^b	30 000
Activités bêta/gamma ($\tau < 1$ jour) ^c	3 800 000
Autres émetteurs bêta/gamma ($\tau > 1$ jour)	40

a. sous forme de vapeur d'eau

b. en aérosol

c. τ est la période radioactive.

Tableau 7.3

Valeurs de référence de rejets radioactifs annuels dans les effluents aqueux

Valeurs de référence exprimées en GBq par an	
Tritium (³H) ^a	1 200 000
Béryllium 7 (⁷Be)	3 600
Activités bêta/gamma ($\tau < 1$ jour) ^b	57 000
Autres émetteurs bêta/gamma ($\tau > 1$ jour)	280

a. sous forme d'eau

b. τ est la période radioactive.

7.6.3

Les mesures de protection

Le tunnel du LHC étant profondément enterré, l'impact radiologique du collisionneur sur l'environnement reste faible malgré son énergie et son intensité élevées. L'épaisseur de la couche de terre et de roche assure que les rayonnements ionisants directs (y compris les muons de haute énergie) n'arrivent pas à la surface. Ainsi les mesures de protection nécessaires se limitent à des blindages souterrains autour des zones de pertes de faisceau afin de limiter la production de radionucléides dans l'eau ou l'air, ou des blindages en tête des puits d'accès pour limiter les rayonnements diffusés dans l'atmosphère.

Dans la suite du document, la quantité de radioactivité produite et rejetée à l'extérieur est comparée avec les valeurs de référence.

7.6.4

Les rejets atmosphériques liés à la ventilation

Les différents processus qui contribuent à l'activation de l'air sont décrits ci-après. Le tableau 7.4 à la page 263 en fait la synthèse et les compare aux valeurs de référence.

La radioactivité dans l'air du tunnel du collisionneur est due aux faibles pertes de faisceau autour de la machine. Elle se calcule en supposant une source linéaire et uniforme de protons tout autour de l'anneau du LHC. Dans le tunnel, le débit de l'air transporté par la ventilation est de 10 m³/s. Entre le moment où l'air radioactif quitte le tunnel et celui où il arrive à l'extérieur du système de ventilation, il s'écoule au minimum 25 secondes. Les valeurs de la radioactivité de l'air, calculées pour le rejet intégré sur une année et pour les radionucléides d'une période supérieure à 1 jour, sont de 0,3 GBq/an, et pour ceux d'une période inférieure à 1 jour, de 1 700 GBq/an.

A cette valeur s'ajoute la radioactivité dans l'air, qui provient des zones des collimateurs. En fait, seuls les collimateurs bêtatron, qui reçoivent la presque totalité des protons, sont pris en considération.

Le calcul de cette activation se fait d'une façon analogue à celui qui est fait pour les autres parties du tunnel. Ce calcul montre que les valeurs pour les radionucléides d'une période excédant 1 jour sont de 2,4 GBq/an et pour ceux d'une période moindre de 11 000 GBq/an. Ces valeurs tiennent compte de la décroissance de la radioactivité pendant le transport à travers le tunnel de la machine, la galerie et le puits avant le rejet.

Enfin, l'air est activé dans les halles des blocs absorbeurs de faisceaux qui sont ventilées à partir du tunnel de la machine. Pour les deux halles, les valeurs à considérer pour les radionucléides d'une période supérieure à 1 jour sont de 0,03 GBq/an, et pour ceux d'une période inférieure de 220 GBq/an. Elles tiennent compte de la décroissance de la radioactivité pendant le transport à travers le tunnel de la machine avant le rejet.

Il n'y a pas de radioactivité dans l'air de ventilation des zones techniques souterraines du fait que ces zones sont ventilées indépendamment de la ventilation du tunnel.

L'air dans les halles d'expérimentation est recyclé deux fois par heure, avec un apport d'air extérieur de 10%. Les interactions dans les expériences mêmes, mais surtout l'activation de l'air autour des quadripôles "faible bêta" doivent être prises en considération pour le calcul de la radioactivité de l'air.

La contribution des deux zones "faible bêta" des expériences ATLAS et CMS pour les radionucléides d'une période inférieure à 1 jour est en effet de deux ordres de grandeur supérieure à la contribution des expériences. Les valeurs calculées pour les radionucléides d'une période supérieure à 1 jour sont de 360 MBq/an pour CMS et de 310 MBq/an pour ATLAS. Pour ceux d'une période inférieure à 1 jour, les valeurs sont de 17 000 GBq/an. Ces quantités, égales pour les deux expériences, sont semblables aux rejets du tunnel et n'ont donc aucune influence radiologique notable.

L'air dans les puits au-dessus des halles d'expérimentation ne circule pas pendant le fonctionnement de la machine. Il est rejeté après l'arrêt de l'accélérateur et avant les travaux de maintenance de l'expérience. La radioactivité dans l'air après une période de fonctionnement de 60 jours est négligeable en comparaison avec celle, déjà minime, rejetée pendant le fonctionnement.

7.6.5

Rejets atmosphériques radiologiques liés aux aéroréfrigérants (vapeur d'eau)

La réfrigération de certains composants de l'accélérateur, notamment les compresseurs cryogéniques et l'électronique, se fait en circuit fermé par l'intermédiaire des 26 aéroréfrigérants du LEP auxquels deux nouvelles installations seulement viennent s'ajouter, l'une au Point 1.8, l'autre au Point 5. Le refroidissement est assuré par évaporation partielle de l'eau et la vapeur d'eau représente le seul rejet dans l'atmosphère.

Les quantités de radionucléides d'une période excédant 1 jour et d'une période moindre contenues dans cette vapeur sont de l'ordre d'un millier et d'un million de fois plus petites que les valeurs directrices, et peuvent ainsi être considérées comme négligeables.

7.6.6

Rejets d'air et normes radiologiques

Dans le tableau 7.4, les radioactivités rejetées par la ventilation au Points 1, 3, 5, et 7 sont présentées et comparées aux valeurs de référence du tableau 7.2. Les activités ont été calculées de la façon suivante :

La ventilation du Point 1 évacue l'air de deux zones "faible bêta", l'air de la halle d'expérimentation ATLAS et l'air d'un quart de l'anneau de la machine. Par le Point 3 est rejeté l'air de la zone de collimateurs et d'un quart de l'anneau. Le

Point 5 évacue l'air de l'une des chambres souterraines abritant un bloc absorbeur, l'air de la halle d'expérimentation CMS, l'air de deux zones "faible bêta" et l'air d'un quart de l'anneau. Enfin, au Point 7 sort l'air de la chambre souterraine abritant l'autre bloc absorbeur et l'air du dernier quart de l'anneau.

L'examen du tableau 7.4 montre, par exemple, que la radioactivité rejetée par la ventilation du Point 5 est extrêmement faible. En effet, pour les radionucléides de période (τ) inférieure à un jour, les rejets correspondent à 17 600 divisés par 3 800 000, soit à 4,6 millièmes de la valeur de référence qui équivaut à 0,2 mSv. Pour les radionucléides de période supérieure à un jour, les rejets correspondent à 1% de la valeur de référence.

Dans ce même tableau, on trouve aussi les quantités de radioactivité rejetées dans l'air par les aéroréfrigérants qui se trouvent aux Points 2, 4, 5, 6 et 8.

Tableau 7.4

Rejets d'air activé par la ventilation et par les aéroréfrigérants pour des radionucléides de période $\tau < 1$ jour et $\tau > 1$ jour en GBq/an

Activités en GBq	Période $\tau < 1$ jour	Période $\tau > 1$ jour
Valeurs de référence	3 800 000	40
Ventilation Point 1	17 500	0,38
Aéroréfrigérants Point 2	12	0,002
Ventilation Point 3	11 500	2,48
Aéroréfrigérants Point 4	14	0,3
Ventilation Point 5	17 600	0,45
Aéroréfrigérants Point 5	12	0,01
Aéroréfrigérants Point 6	5	0,004
Ventilation Point 7	535	0,10
Aéroréfrigérants Point 8	8	0,002

7.6.7

Les eaux souterraines

La plus grande partie du tunnel dans lequel est installé le LHC est situé entièrement dans la molasse. Cette roche ne contient pas de nappes aquifères mais une proportion d'environ 10% d'eau de constitution. Cette eau n'est en communication ni avec l'eau des couches supérieures plus proches de la surface, ni avec l'eau des nappes phréatiques. Quelques infiltrations existent par endroits,

principalement le long des fûts des puits. L'eau souterraine à l'extérieur du tunnel provenant de ces infiltrations est légèrement activée à cause des faibles pertes de faisceaux réparties autour de la machine, mais également dans les régions des collimateurs, des expériences et des arrêts de faisceaux où les pertes sont plus concentrées.

La présence de radionucléides dans l'eau souterraine provient de divers processus indépendants :

- la création éventuelle de différents radionucléides dans la roche entourant le tunnel et leur dissolution dans les eaux souterraines,
- la radioactivité créée directement dans l'eau souterraine,
- la réabsorption de ces nucléides par le sol, les argiles et les particules rocheuses, qui ont la propriété de retenir certains éléments.

Parmi les radionucléides produits, le ^3H et le ^{22}Na sont les seuls susceptibles d'être présents dans l'eau, car le ^7Be est fortement réabsorbé par les roches, et la migration des autres isotopes est très lente en comparaison avec leurs périodes radioactives. D'autre part, la production directe de ^3H dans l'eau est à peine deux fois plus élevée que dans la roche.

La production annuelle totale de la radioactivité dans l'eau souterraine autour du LHC est de 73 GBq pour le ^3H et de 15 GBq pour le ^{22}Na . Ces valeurs sont négligeables par rapport aux valeurs de référence pour la totalité des effluents du LHC, qui sont de 1 200 000 GBq pour le tritium, et de 280 GBq pour les autres émetteurs bêta-gamma.

7.6.8

Rejets d'eau de refroidissement de la machine

Les circuits de refroidissement sont des circuits fermés ; normalement la radioactivité induite reste donc à l'intérieur de ces circuits. Néanmoins, la vidange d'un de ces circuits, par exemple lors de travaux d'entretien, pourrait entraîner le rejet de cette radioactivité. Pour cette raison, les quantités de la radioactivité totale dans chaque circuit, après une année de fonctionnement, ont été calculées.

Il apparaît que la plus grande partie de la radioactivité dans l'eau de refroidissement est induite dans le système de collimateurs du nettoyage des faisceaux. Après un an de fonctionnement du LHC, l'activité totale induite dans l'eau de refroidissement est de 3,5 GBq pour le ^3H et de 15 GBq pour le ^7Be . Les valeurs de référence pour les rejets, dans ses effluents, sont de 1 200 000 GBq pour le ^3H et de 3 600 GBq pour le ^7Be . Les produits radioactifs de corrosion sont absorbés, soit dans les résines des échangeurs d'ions qui purifient l'eau en continu, soit lors d'un travail d'entretien dans une colonne échangeur d'ions qui purifie l'eau de vidange. Les résines sont soigneusement contrôlées et stockées pendant de longues périodes pour permettre la décroissance de leur radioactivité.

7.6.9

Rejets d'eau brute

Deux tuyaux d'un diamètre de 30 et 25 cm, enfouis dans le béton du sol du tunnel, approvisionnent les installations du LHC en eau brute. L'eau brute activée par les pertes dues aux interactions entre les protons et les gaz résiduels dans la chambre à vide autour de l'anneau, est pompée par les puits jusqu'aux échangeurs atmosphériques situés en surface, aux Points 1, 1.8, 2, 4, 5, 6 et 8. Les rejets dans l'atmosphère sont traités au paragraphe 7.6.5 à la page 262.

L'eau sortant du Point 1 s'écoule dans le Nant d'Avril en Suisse. Les rejets de radionucléides d'une période radioactive supérieure à 1 jour (0,47 GBq) provenant de ce puits sont négligeables. Ils ne représentent que 0,3% de la valeur de référence (voir tableau 7.3). L'activité des radionucléides aux périodes radioactives courtes décroît rapidement entre sa sortie et le rejet dans le Nant d'Avril. Seul le ^{11}C survit en quantité significative, mais son activité de 37 GBq reste largement inférieure à la valeur de référence annuelle de 57 000 GBq.

7.6.10

Rejets d'eau de drainage

Pour une estimation de la radioactivité due aux pertes de protons dans l'eau de drainage de l'un des 8 octants, on suppose une source linéaire et uniforme de protons. Le système de drainage sert principalement à recueillir une faible quantité (8 m³ par heure) d'eau brute ayant servi au refroidissement de deux alvéoles électriques par octant. La concentration d'un radionucléide est une fonction de sa probabilité de production dans l'eau par l'interaction d'un proton. Pour ce qui concerne la zone des collimateurs, l'eau dans le drain situé dans le radier du tunnel est irradiée lors de son passage par les pertes locales de protons.

Le drain principal dans le tunnel a un diamètre de 50 cm¹. Normalement, le drain n'est pas rempli à plus de 10% et l'eau s'écoule à un débit de 0,014 m³/s. Si l'on considère que l'eau dans le drain est irradiée par les pertes de protons tout autour du tunnel, et qu'elle traverse les régions des collimateurs situés dans les octants 3 et 7 (sur une longueur totale de l'octant de 150 m), l'activité des deux principaux radionucléides de l'eau d'une période excédant 1 jour est de 0,016 GBq pour le ^3H et de 0,38 GBq pour le ^7Be , ce qui est très faible par rapport aux valeurs de référence pour les rejets. En effet, ces valeurs représentent respectivement environ un dix millième et moins d'un millionième des valeurs de référence (voir tableau 7.3). La contribution au rejet des autres radionucléides d'une période supérieure à 1 jour est négligeable.

La radioactivité d'une période inférieure à 1 jour produite dans les drains qui passent par les zones des collimateurs est de 39 000 GBq par an. Les radionucléides sont composés à plus de 93% de ^{14}O et de ^{15}O de périodes radioactives d'une et deux minutes respectivement. Le reste de la radioactivité est de ^{13}N et de ^{11}C à parts égales, qui ont des périodes radioactives de 10 et

1. Il n'y a pas de drainage dans les zones de quadripôles "faible bêta".

20 minutes. L'eau de drainage de l'octant 3 du tunnel est pompée à la surface par le puits PM 32, à 1 300 m de distance de la zone des collimateurs. Compte tenu de la vitesse d'écoulement de l'eau dans les drainages (0,7 m/s), la radioactivité de l'eau avant son pompage en surface est de 700 GBq pour une valeur de référence de 57 000 GBq par an. Dans le tableau 7.6, les rejets de radioactivité dans l'environnement par l'eau pendant le fonctionnement du LHC sont récapitulés et comparés aux valeurs de référence du tableau 7.3. La plus grande partie de l'eau passe par le Point 1 avant d'être rejetée dans le Nant d'Avril.

7.6.11

Rejets d'eau et normes radiologiques

La comparaison de l'activité des radionucléides rejetés aux divers points avec les valeurs de référence correspondantes montre que les niveaux des rejets sont faibles.

Tableau 7.5

Inventaire de l'eau activée aux différents points de rejet en GBq/an

Radionucléides	^3H	^7Be	Période $\tau > 1 \text{ jour}^a$
Valeur de référence en GBq	1 200 000	3 600	57 000
Nant d'Avril	0,035	0,83	37
Rejets au Point 2	0,000038	0,0009	3,2
Rejets au Point 3.2	0,016	0,38	700
Rejets au Point 4	0,0004	0,00097	1,1
Rejets au Point 5	0,00024	0,0057	2,7
Rejets au Point 6	0,000099	0,0024	2,6
Rejets au Point 7	0,000074	0,0018	0,93
Rejets au Point 8	0,000066	0,0016	4,8

a. Il s'agit des radionucléides suivants : ^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , sauf au Point 3.2 où seuls ^{11}C , ^{13}N sont présents.

Tableau 7.6

Inventaire de l'eau activée qui reste contenue dans le souterrain et les circuits de refroidissement de la machine en GBq/an

Radionucléides	^3H	^7Be	^{22}Na
Valeur de référence en GBq	1 200 000	3 600	280
Eau souterraine	72	–	15
Eau déminéralisée	3,6	15	–

7.6.12

Résumé

L'impact radiologique du LHC sur l'environnement est négligeable. La radioactivité induite dans la roche autour du tunnel est minime en comparaison avec la radioactivité naturelle, et n'a pas d'effet sur l'environnement. Les débits de dose en surface des rayonnements engendrés par le fonctionnement du collisionneur sont largement en dessous des limites en vigueur. Les quantités de radioactivité rejetées dans l'environnement par les voies aériennes et les cours d'eau sont minimales et restent en-dessous des valeurs de référence que le CERN s'impose. Ces valeurs sont calculées sur la base des limites de dose les plus strictes en vigueur dans la législation des pays-hôtes.

7.7

Déblais

7.7.1

Généralités

Les chantiers du projet LHC vont produire d'une part des déblais naturels, d'autre part des déchets liés à la démolition d'ouvrages existants, ainsi qu'à l'activité sur les chantiers eux-mêmes. Trois types de déblais naturels sont produits : de la terre végétale, des moraines pour les couches supérieures du terrain, de la molasse pour les couches inférieures. La terre végétale est inventoriée et stockée avant d'être réutilisée. Les autres déblais sont mis en dépôt.

Les principes gouvernant le choix des zones de dépôt sont les suivants :

- éviter la traversée des agglomérations et limiter le parcours des camions de transport afin de réduire les nuisances pour la population et l'environnement. Les zones de dépôt sont donc aussi proches que possible des zones de travaux.
- mettre à profit ces dépôts pour réaliser des aménagements paysagers et améliorer ainsi, le cas échéant, l'intégration des sites LHC dans l'environnement.

Les processus de transport et de mise en dépôt de ces déblais sont précisés au paragraphe 7.11.3.2 à la page 281.

Les travaux du projet LHC vont également donner lieu à la démolition de structures en béton. En effet, les ouvrages projetés doivent être raccordés aux ouvrages existants, principalement les ouvrages souterrains.

Une procédure respectueuse de l'environnement est adoptée pour les blocs de béton issus de ces démolitions. Il est en effet prévu de les concasser et de les séparer de leurs éléments métalliques afin d'obtenir un matériau utilisable en remblai des nouveaux ouvrages.

De façon générale, tous les déchets sont traités, triés ou entreposés conformément à la réglementation en vigueur en France comme en Suisse. Dans tous les cas où c'est possible, le recyclage est la solution adoptée. En ce qui concerne la France, la procédure d'élimination des déchets ultimes est celle prescrite par la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE). Si une mise en dépôt se révèle nécessaire, elle est effectuée dans des décharges agréées.

7.7.2

Les déblais

Trois zones de dépôt ont été retenues pour répartir les déblais naturels excavés lors des travaux de construction du LHC. La faible distance qui les sépare des principaux lieux d'extraction réduit le trafic routier au minimum. En effet, 80% du volume total des déblais sont transportés hors réseau routier public, par des pistes de chantier créées spécialement (voir figure 7.32).

7.7.2.1

Description point par point

Le tableau 7.7 ainsi que la figure 7.30 donnent une estimation, chantier par chantier, du volume foisonné des déblais naturels à évacuer.

Tableau 7.7

Déblais naturels produits par la construction du LHC

Lieu des travaux	Volume excavé en m ³ (foisonnement compris) ^a		
	Moraine	Molasse	Total
Point 1	15 600	175 200	190 800
Point 1.8	6 600	10 100	16 700
Point 2	1 800	7 100	8 900
Point 3	1 900	0	1 900
Point 4	2 800	1 300	4 100
Point 5	53 300	136 800	190 100
Point 6	2 300	28 800	31 100
Point 7	1 500	1 500	3 000
Point 8	3 600	6 400	10 000
Tunnel TI 2	9 600	56 400	66 000
Tunnel TI 8	500	50 900	51 400
Total	99 000	475 000	574 000

a. Coefficient de foisonnement moyen : 1,5

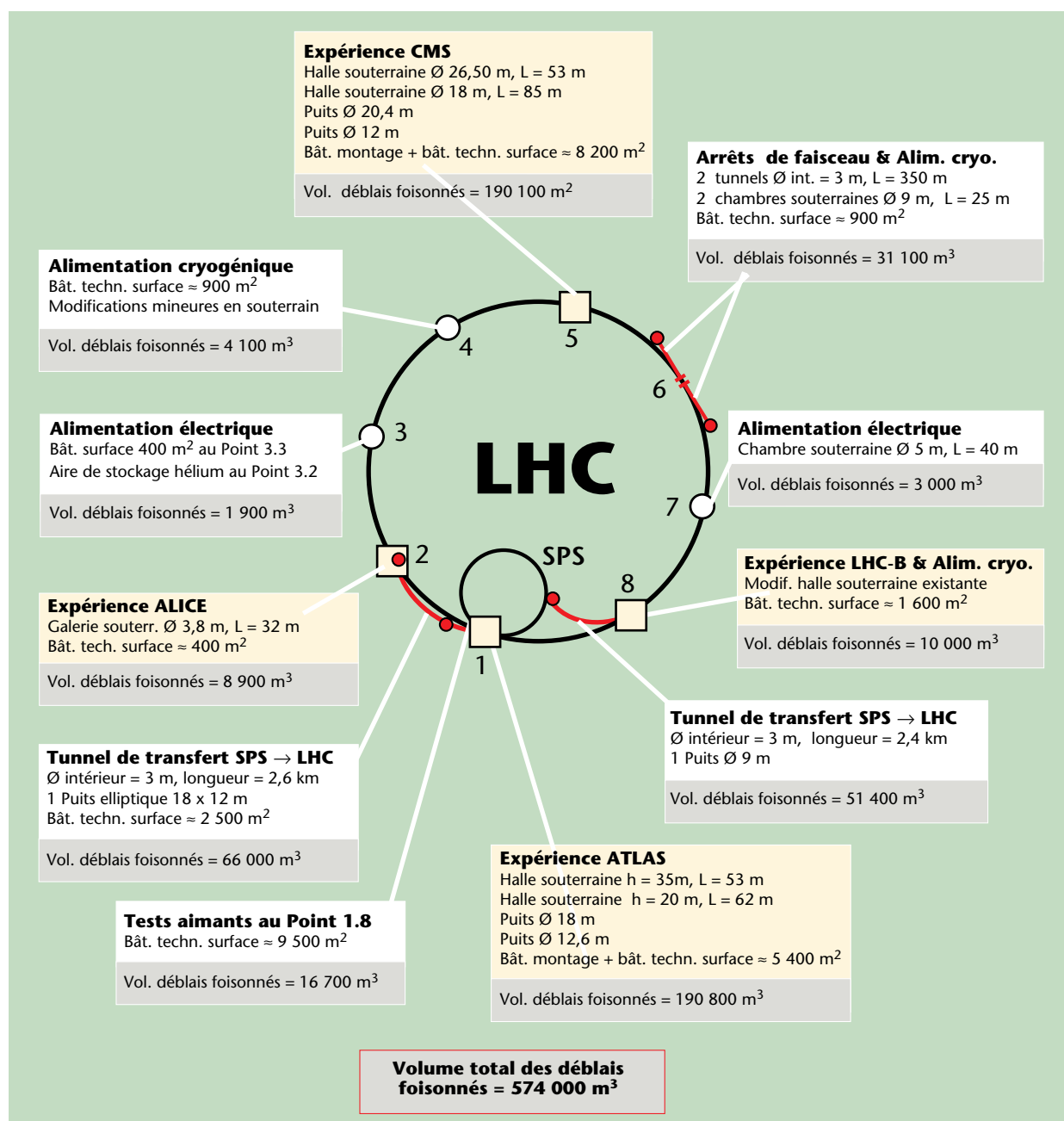


Figure 7.30

Principaux ouvrages et déblais produits par la construction du LHC

7.7.2.2

Les zones de dépôt des déblais

La zone de dépôt pour les déblais en provenance des Points 1, 1.8, 2, 3, 4 et 8, ainsi que des tunnels T1 2 et T1 8 (environ 350 000 m³), est située sur le territoire de la commune de Prévessin-Moëns, au lieu-dit Bois de Serves, sous la ligne haute tension (400 kV) d'EDF. Elle se trouve dans une zone non urbanisée de la commune sur une surface maintenue sans végétation haute pour les

besoins de la ligne. La hauteur et la configuration du dépôt sont déterminées en accord avec EDF (voir figure 7.31). Des études *ad hoc* réalisées par un bureau de géotechnique ont montré que de tels dépôts n'auraient pas d'influence sur les massifs de fondation des pylônes. Les espaces non remblayés autour de ces pylônes préservent les passages de la faune. L'écoulement des eaux est rétabli par la création de caniveaux et de fossés et, si nécessaire, par la pose de canalisations.

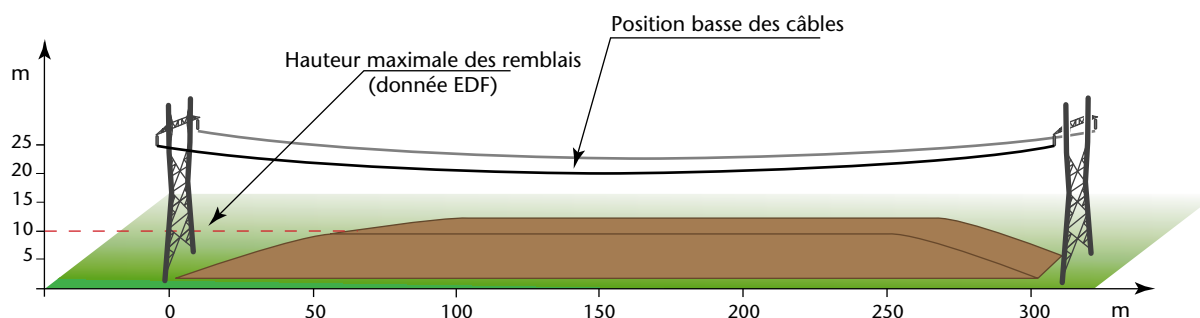


Figure 7.31

Principe de la mise en dépôt sous la ligne à haute tension

Les déblais du Points 5 représentent un volume de l'ordre de 190 000 m³. Pour épargner un trafic de camions aux riverains immédiats du site de Cessy et à la demande de la municipalité, ils sont déposés à proximité du site du Point 5.

Une partie de ces déblais est utilisée pour réaliser des plates-formes paysagères autour des futures installations. La plantation d'essences locales sur et autour de ces plates-formes sous forme de bosquets valorise l'aspect du site.

Le reste des déblais sert à remodeler une déclivité naturelle du terrain située à environ 500 m au sud-est du site. Un chemin de campagne est aménagé en piste provisoire pour leur transport, qui s'effectue ainsi en dehors du réseau routier public. Ce chemin de campagne est transformé en chemin de promenade à la fin des travaux. Quant à la zone de dépôt elle-même, elle est en partie aménagée en zone de détente, en étroite collaboration avec la commune, l'autre partie étant rendue à un usage agricole.

Le plus grand soin est apporté au respect de l'ordre naturel des couches successives (molasse, moraines, terre végétale), ainsi qu'au système d'évacuation des eaux de ruissellement. Les buttes artificielles comportent la même stratification que le terrain naturel. Un plan d'eau est créé dans la zone de dépôt située à l'est du site afin d'absorber les variations de débit et d'éviter ainsi tout risque d'inondation en aval.

Les déblais en provenance des Points 6 et 7 (soit environ 34 000 m³) sont déposés sur des terrains mis à la disposition du CERN par l'Etat français lors de la construction du LEP. Ils jouxtent les installations actuelles du Point 6. Ces zones boisées sont pour partie restées à la disposition des anciens propriétaires, qui les

ont éclaircies au fil des ans pour les besoins de leurs coupes de bois annuelles. Des plantations d'essences locales sont effectuées une fois le dépôt terminé.

Les déblais extraits au Point 7 (3 000 m³ environ) empruntent le tunnel du LEP vers le Point 6.

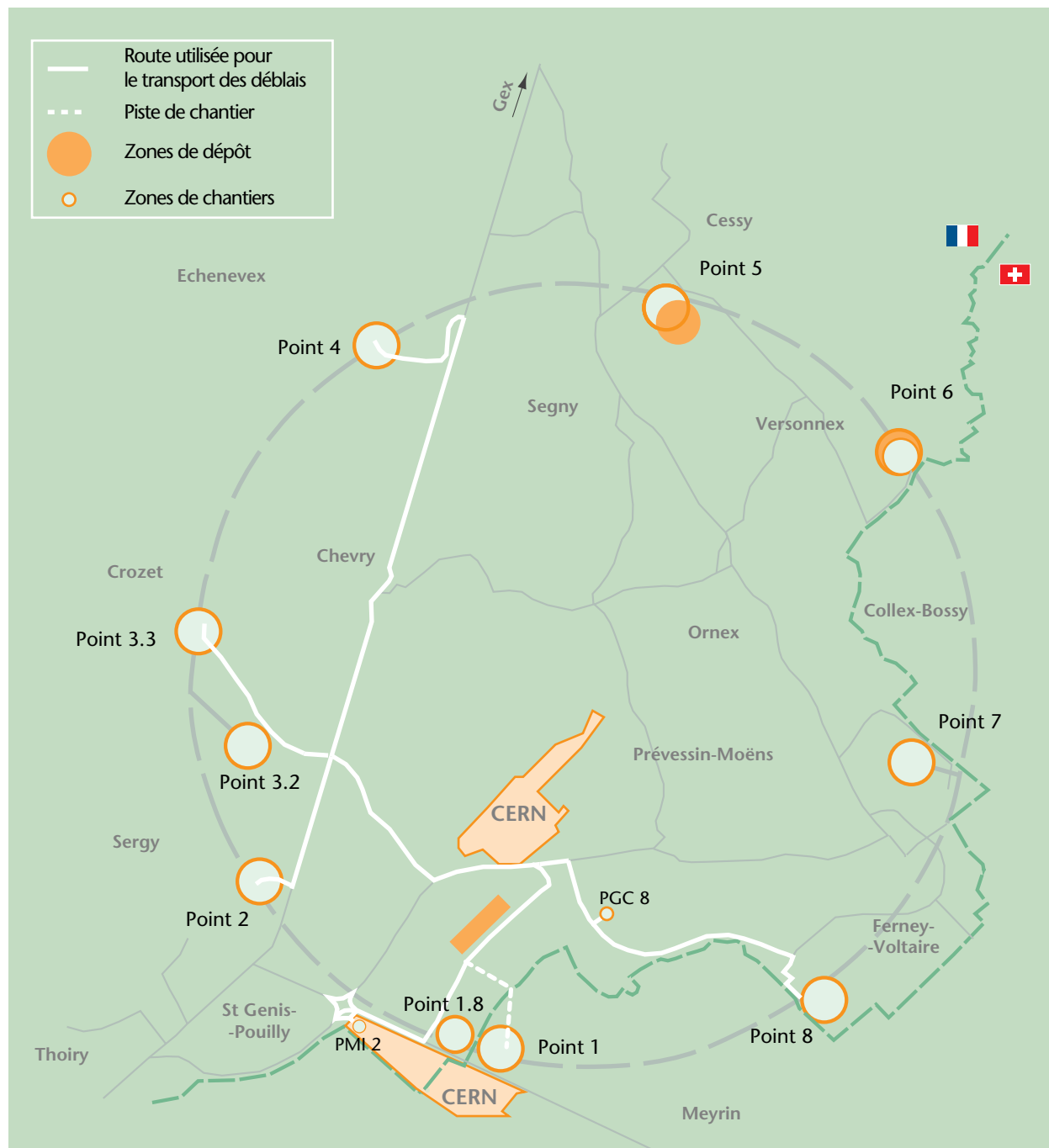


Figure 7.32

Zones de dépôt des déblais et routes utilisées

7.8

Déchets

7.8.1

Les bétons

Pour les bétons issus des démolitions, le CERN a décidé d'adopter une procédure respectueuse de l'environnement. Il est en effet prévu de les concasser et d'en extraire les armatures en acier afin d'obtenir un matériau réutilisable. Cela présente à la fois l'avantage de régler la question de l'élimination des bétons, qui ainsi ne quittent pas les chantiers, et celui de diminuer le volume des matériaux de remblais à approvisionner. Les bétons sont traités dans le pays où ils sont extraits.

7.8.1.1

Volume et lieu d'extraction

Les volumes calculés des bétons de démolition et leur localisation dans le cadre du projet sont donnés dans le tableau 7.8.

Tableau 7.8

Volume et lieu d'extraction des bétons de démolition

Lieu	Volume (m ³)
Point 1	1 350
Point 1.8	0
Point 2	1 800
Point 3	0
Point 4	900
Point 5	1 300
Point 6	1 900
Point 7	400
Point 8	1 600
Tunnel TI 2	30
Tunnel TI 8	20
Total	9 300

7.8.1.2

Procédé de recyclage

Les bétons issus de la démolition d'ouvrages existants sont découpés à la scie circulaire ou au marteau-piqueur suivant le cas, les armatures étant sectionnées au chalumeau afin d'obtenir des blocs transportables par les engins du chantier, d'un volume de 200 litres maximum.

Les bétons issus des ouvrages souterrains sont stockés dans l'enceinte du chantier une fois transportés en surface. Ils sont ensuite broyés au moyen d'une installation mobile pour obtenir un matériau dont la granulométrie permet de réaliser des remblais de qualité. Pour les bétons armés, cette même installation procède au moyen d'un puissant électroaimant à la séparation des aciers, qui sont récupérés pour la ferraille.

Les matériaux obtenus par broyage sont utilisés pour le remblaiement contre les parties enterrées, sous les dallages des ouvrages de surface, ou en couches de fondation des pistes, routes et zones de stationnement. Leur utilisation limite d'autant le volume de tout-venant à approvisionner de l'extérieur.

7.8.1.3

Les bétons activés

Pour fournir des protons au LHC à partir du SPS, deux nouveaux tunnels de transfert partent des Points 4 et 6 du SPS. Des mesures de radioactivité dans le béton et la molasse ont été effectuées aux endroits où se font les connexions entre les tunnels¹. Les résultats de mesure de la radioactivité massique en fonction de la profondeur montrent que la radioactivité est plutôt contenue par le béton de la paroi intérieure du tunnel ; seule une très faible quantité des déchets issus de la démolition, de l'ordre de 10 m³, ainsi que de molasse, environ 20 m³, peut être considérée comme radioactive. La valeur maximale de la radioactivité massique mesurée est de 3 Bq/g. Elle comprend des radionucléides artificiels de ²²Na, ⁴⁴Sc, ⁵⁴Mn et ⁶⁰Co, mais aussi la radioactivité naturelle de ⁴⁰K, ²²⁶Ra et ²³²Th de 1,7 Bq/g. Ces déchets de démolition et les déblais de la molasse sont stockés au CERN étant donné leur très faible radioactivité.

7.8.2

La bentonite

Si certains travaux (parois moulées ou colmatage) nécessitaient la mise en œuvre de bentonite (voir Figure 5.3), l'entreprise concernée serait tenue d'assurer la récupération et l'élimination de cette matière. Le CERN veillerait alors au respect de la procédure d'élimination prescrite par les autorités compétentes en France et en Suisse, et à la mise en dépôt dans des décharges agréées.

7.8.3

Autres déchets de chantier

Des déchetteries de chantier sont implantées sur toutes les zones de travaux. Elles sont sélectives et le tri et la récupération des déchets se font donc par catégorie (huiles de vidange, matières plastiques, emballages, métaux...).

L'obligation d'installer ces déchetteries, ainsi que leur maintenance, sont spécifiées dans le Cahier des charges des entreprises contractantes.

1. Réf. : CERN/TIS-RP/IR-17 (1996)

7.8.4**Déchets produits en période d'exploitation**

La quantité de déchets industriels et ménagers produits par le CERN n'augmente pas avec le LHC et reste relativement faible. Ces déchets sont traités selon les procédures décrites au chapitre 6 et actualisées si nécessaire selon l'évolution de la législation (voir paragraphe 6.10 à la page 207).

7.8.5**Déchets radioactifs et démantèlement**

En ce qui concerne les déchets radioactifs, le LHC ne modifiera pas la situation actuelle telle qu'elle a été décrite au chapitre 6.

Le LHC fonctionnera au moins une vingtaine d'années à partir de sa mise en route en 2005. Aucun démantèlement n'interviendra d'ici là. Il faut rappeler que dans tous les cas la radioactivité induite est incorporée dans la masse de certains composants du LHC, de sorte qu'il n'y a pas de risque de contamination de l'environnement. Les modalités d'un tel démantèlement sont toutefois étudiées en détail dans l'Annexe technique n° 18, "Etude de danger de l'installation LHC".

7.9**Effets sur les ressources en eau**

7.9.1**Consommation d'eau**

Avec le LHC, la consommation en eau potable est sensiblement égale à la consommation actuelle, voire en légère diminution suite à l'arrêt des expériences LEP. La consommation d'eau brute utilisée pour le refroidissement de certains composants de l'accélérateur reste stable elle aussi (voir paragraphe 2.2.9 à la page 43 et tableau 6.1 à la page 188).

7.9.2**Impact des travaux sur les nappes aquifères**

Tous les ouvrages souterrains du LHC sont réalisés dans la molasse et aucun puits ou ouvrage ne se trouve situé à l'intérieur d'un périmètre, même éloigné, de protection de captages.

Au Point 5, seul endroit où les puits traversent des nappes aquifères, des mesures précises ont été faites lors de la campagne de sondages effectuée en 1994-1995 dans cette zone.

L'étude approfondie de ces nappes a notamment été réalisée par essais de traçage, afin de déterminer les perméabilités, les vitesses de transfert, la diffusion, les dispersions latérale et longitudinale, et afin de mettre en évidence une éventuelle communication entre les deux nappes. Le but est de pouvoir quantifier correctement les impacts de l'ouvrage sur l'écoulement des eaux dans le sillon,

de fixer les paramètres d'exécution en phase de construction (principalement dans le cadre de la congélation), d'apprécier les impacts d'accidents éventuels en cours de construction (par exemple une rupture de congélateur), et de quantifier l'influence des ouvrages sur l'écoulement des eaux de l'Oudar.

Les résultats de ces mesures sont présentés au paragraphe 6.5.2.3 (page 183) et dans l'Annexe technique n° 3, "Annexes hydrologiques et hydrogéologiques". Rappelons ici que la frontière entre les deux nappes est relativement imperméable. En outre, ces nappes ne sont pas captées et les écoulements sont sensiblement orientés nord-est/sud-ouest. Même en cas de pollution accidentelle, risque contre lequel des mesures préventives adéquates sont prises, il n'y aurait donc aucun risque pour l'alimentation en eau de la population.

7.9.3

Rivières, pêche et pisciculture

La plus grande partie des eaux rejetées a été préalablement employée pour la réfrigération des composants des grands accélérateurs. Durant son parcours, elle ne subit aucune altération chimique et n'est soumise à aucun risque de pollution. Cette eau est rejetée dans le Nant d'Avril, en Suisse.

Les eaux pluviales et de drainage des ouvrages souterrains rejetées dans les cours d'eau aux Points 2, 3, 5 et 6 ont des caractéristiques qualitatives et des débits qui permettent d'éliminer tout risque d'impact sur les cours d'eau récepteurs où ils se déversent.

Le rejet du Point 4 se déverse dans la Varfeuille. Ce cours d'eau présente un faible débit et une mauvaise qualité de l'eau. L'apport d'un certain débit d'eau de meilleure qualité est susceptible d'entraîner une légère amélioration de la situation en aval, notamment en période d'étiage.

Les rejets des Points 7 et 8 se déversent dans des petits récepteurs actuellement dégradés qui appartiennent au bassin du Gobé. Aucun impact sensible n'a été constaté.

Pour éviter des pollutions occasionnelles dues au drainage d'hydrocarbures d'origine géologique, les mesures de précautions adéquates sont prises : séparateurs, contrôles continus, arrêt des rejets en cas de pollution, etc. (détails au chapitre 8). Toutefois, étant donné l'état actuel des récepteurs concernés, les impacts potentiels de ces pollutions éventuelles restent faibles sur la faune et la flore aquatique et riveraine.

Pour l'ensemble de ces rejets, la situation actuelle n'est pas modifiée par le LHC.

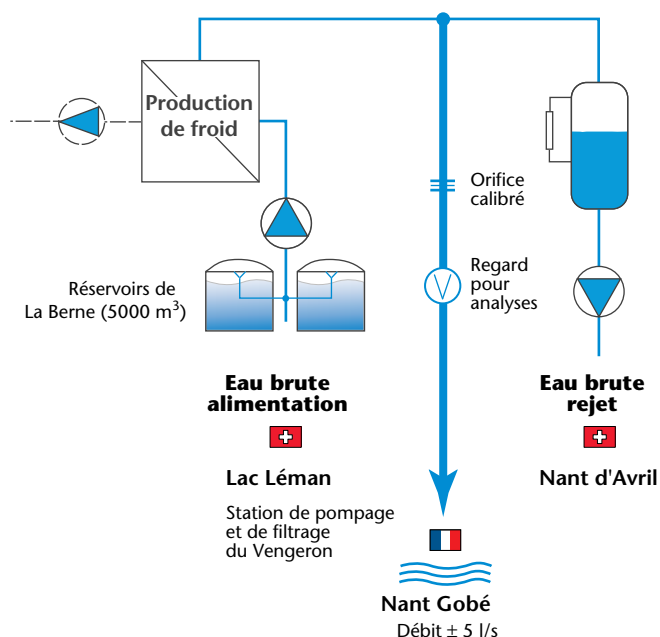


Figure 7.33

Dérivation pour l'alimentation du Nant Gobé

Au Point 7, à la demande de la Direction départementale de l'agriculture et de la forêt ainsi que de la commune de Ferney-Voltaire, le CERN va mettre en place une dérivation sur la conduite de rejet d'eau brute afin d'éviter l'assèchement du Nant Gobé en période d'étiage.

7.10

Le bruit et les ébranlements

7.10.1

Les bruits liés aux chantiers

Il s'agit d'un impact momentané qu'il convient toutefois de prendre en considération. Les différentes sources de bruits possibles pendant la période de réalisation des ouvrages sont les suivantes :

- les mouvements des engins et matériels de chantier, particulièrement aux Points 1 et 5 et dans le secteur des puits de génie civil des tunnels de transfert ; ces mouvements sont limités aux heures réglementaires de travail. Les compresseurs nécessaires pour la congélation éventuelle du sol avant travaux seraient insonorisés et l'installation de centrales à béton sur les sites¹ s'accompagnerait du montage d'une enceinte anti-bruit.

1. Si tel était le choix de l'entreprise chargée des travaux

- l'emploi éventuel des explosifs du fait d'impératifs techniques. S'il était nécessaire, il serait limité au strict minimum.
- l'accroissement de la circulation routière, particulièrement le trafic lié au transport des déblais. Cependant, comme ceci a été expliqué plus haut, les emplacements choisis pour les zones de dépôt réduisent considérablement ces nuisances.

7.10.2

Les ébranlements (tirs de mines)

La question de l'emploi d'explosifs a été traitée en détail au paragraphe 5.1.5.3 à la page 143.

Rappelons ici que le minage est limité aux endroits où les moyens mécaniques ne sont pas utilisables. Il peut s'agir du creusement des puits dans la moraine (essentiellement en abattage) ou de la partie basse des grandes halles souterraines (toujours en abattage). Toutes les précautions d'utilisation requises sont prises et le CERN s'adjoint le concours d'un laboratoire spécialisé agréé pour veiller au bon déroulement des opérations.

7.10.3

Le LHC en fonctionnement

Seuls les Points 1, 1.8 et 5 font l'objet de modifications substantielles. A ces endroits, les appareillages situés à l'extérieur et émettant des bruits sont les échangeurs atmosphériques, les transformateurs et les différentes ventilations. Ces installations sont équipées de manière à limiter l'émission de bruits, qui respecte toujours la réglementation en vigueur. De plus, des mesures complémentaires sont prises pour réduire encore les nuisances phoniques, notamment par la construction de bâtiments spécifiquement conçus pour abriter les équipements les plus bruyants (voir chapitre 8).

7.11

Transport, circulation et voirie

7.11.1

Généralités

La construction du LEP avait été l'occasion de renforcer certains axes routiers existants et de créer de nouvelles routes. Elle avait ainsi permis de réaliser des aménagements planifiés de longue date du fait de l'augmentation de la population du Pays de Gex, et n'ayant jusque-là pas trouvé de financement. Les aménagements avaient été réalisés de manière à relier les nouveaux sites (sept en France, un en Suisse) aux sites de Prévessin et de Meyrin du CERN de façon rationnelle, en contournant les principales agglomérations (Gex, Prévessin-Moëns, Ferney-Voltaire).

Un schéma de circulation avait été défini pour tous les transports, hormis les véhicules légers, en fonction du gabarit et de la capacité des routes. Dans certains cas, des lignes électriques et téléphoniques aériennes avaient été rehaussées pour permettre le passage de transports hors gabarit. L'infrastructure routière mise en place pour le LEP retrouve toute son utilité pour les transports LHC.

7.11.2

Nouveaux aménagements routiers

L'ensemble du réseau routier développé à l'occasion de la construction du LEP est parfaitement adapté pour les transports LHC ; seuls trois aménagements spécifiques sont nécessaires.

7.11.2.1

Sortie ouest du site de Meyrin du CERN (Saint Genis-Pouilly)

Le puits de génie civil PMI 2 du tunnel de transfert TI 2 se trouve à l'extrémité ouest du site de Meyrin. Il est aussi utilisé pour introduire les aimants de courbure. En accord avec les autorités douanières, la clôture du site de Meyrin est déplacée d'une cinquantaine de mètres vers l'est, rendant le chantier indépendant du site de Meyrin et directement accessible depuis la France. Une bretelle provisoire de connexion avec le rond-point dit du CERN à Saint Genis-Pouilly est nécessaire pour évacuer les déblais du tunnel de transfert TI 2, et pour acheminer les aimants à introduire dans le tunnel. La figure 7.34 montre un schéma possible de cet aménagement.

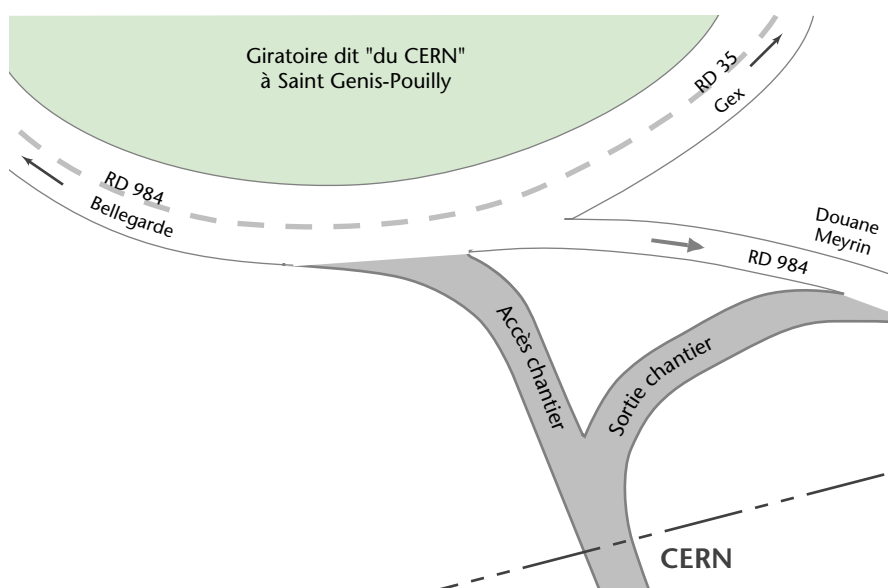


Figure 7.34

Un aménagement possible pour la sortie ouest du site de Meyrin

7.11.2.2

Carrefour VC 5/RD 984 (Prévessin-Moëns)

La route VC 5, appelée route de l'Europe, débouche sur la RD 984 reliant Saint Genis-Pouilly à Meyrin. La VC 5 est utilisée par le CERN pour relier les sites de Prévessin et de Meyrin. Elle est aussi largement utilisée par d'autres usagers pour le passage du poste de douane de Prévessin-RN 84/Meyrin. Elle connaît un trafic de 2 500 véhicules par jour. La circulation de près de 14 000 véhicules par jour sur la RD 984 rend son accès difficile depuis la VC 5. L'insertion des transports LHC est peu aisée. Un nouveau carrefour à la jonction de la VC 5 (Prévessin-Moëns) et de la RD 984 est donc nécessaire pour la sécurité et la fluidité du trafic. Cette nouvelle infrastructure doit aussi assurer un accès facile au passage souterrain du CERN sous la route RD 984. Les terrains sur lesquels elle doit être aménagée appartiennent à l'Etat français. Les figures figure 7.35 et 7.36 montrent les possibilités d'aménagement de ce carrefour.

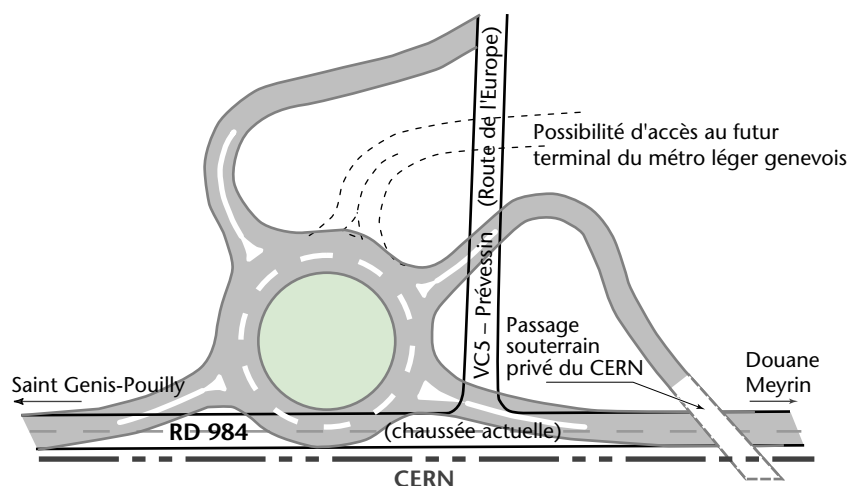


Figure 7.35

Aménagement possible pour le carrefour VC 5/RD 984

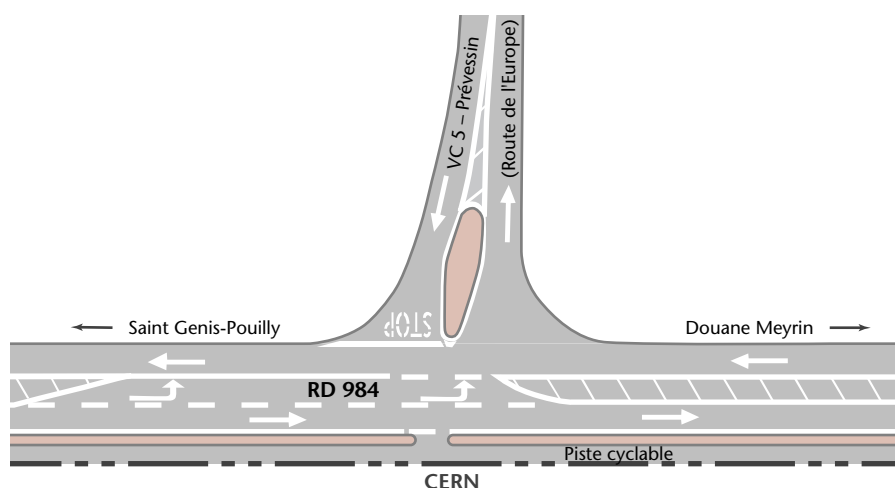


Figure 7.36

Autre possibilité d'aménagement pour le carrefour VC 5/RD 984

7.11.2.3**Aménagement de la RD 15g à la sortie du Point 5 à Cessy**

Le Point 5 étant l'un des deux grands chantiers du LHC, il connaît une intense activité pendant les travaux de construction et la période d'installation de l'expérience CMS. La sortie de ce site sur la route RD 15g reliant Versonnex à Cessy est dangereuse car elle se trouve en pleine courbe. Un aménagement est nécessaire pour garantir la sécurité des usagers et faciliter l'accès au chantier. Il est illustré par le schéma présenté à la figure 7.37.

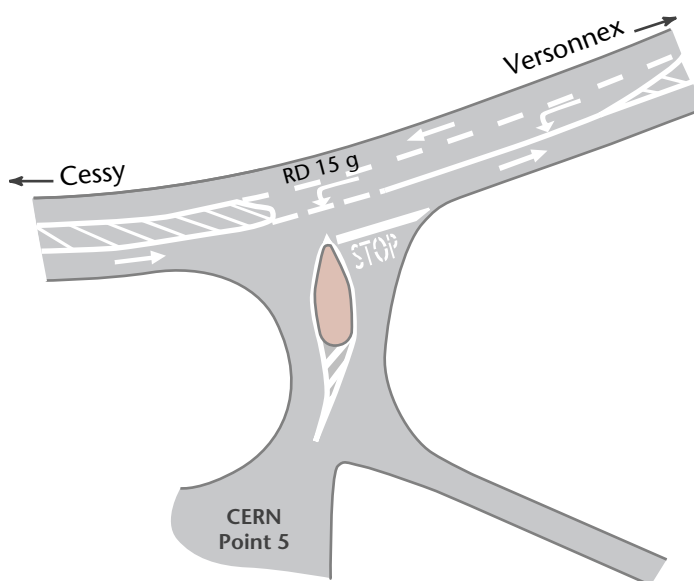


Figure 7.37

Un aménagement possible de la RD 15g pour l'accès au Point 5 à Cessy

7.11.3**Le trafic induit**

Bien que la quantité de matériaux et d'équipements à transporter soit importante, la durée du chantier, de 1998 à 2005, et la dispersion géographique des sites ont pour conséquence de diluer le trafic à un niveau raisonnable.

Pour le matériel convergeant vers le CERN depuis les divers pays européens fournisseurs, les industriels seront invités à utiliser, dans la mesure du possible, la voie de chemin de fer Bellegarde-Divonne qui dessert le Pays de Gex.

Le trafic induit par les travaux de construction et d'installation du LHC est décrit de manière détaillée ci-après. Il est fonction des différentes phases de réalisation du projet : démontage du LEP, travaux de génie civil, installation des expériences et de la machine, exploitation. la figure 7.38 à la page 286 donnent les pointes de trafic sur les différentes routes.

7.11.3.1

Trafic induit par le démontage du LEP

Après l'arrêt définitif du LEP, ses équipements sont démontés et stockés, en grande partie sur le site de Meyrin et en partie sur les sites mêmes où ils étaient installés. Les éléments réutilisables pour un éventuel futur collisionneur électron-proton sont conditionnés pour un long stockage dans l'anneau des ISR désaffecté.

Les 3 400 aimants du LEP, qui représentent l'équipement le plus volumineux, restent sur les différents sites du LEP, soit utilisés en souterrain comme éléments de blindage, soit stockés en surface. Les cavités accélératrices et les chambres à vide sont extraites du tunnel par le puits du Point 1.8. Les autres équipements, tels que par exemple câbles, tuyauteries et chemins de câbles, sont extraits aux Points 2, 4, 6 et 8 pour être acheminés sur le site de Meyrin.

Les travaux de démontage sont programmés pour l'an 2000. Ils pourraient être repoussés d'un an si le fonctionnement du LEP était prolongé, éventualité qui dépend des résultats de la physique.

Les routes empruntées sont celles qui relient les Points 1.8, 2, 4, 6, et 8 au site de Meyrin. L'ensemble des travaux de démontage nécessite environ 2 500 transports à partir de ces 5 points d'extraction sur une période d'une année, soit un trafic de 10 transports par jour, soit 20 camions par jour compte tenu des trajets aller et retour. Ce trafic converge vers la route RD 984 avant de bifurquer sur la route VC 5 de Prévessin-Moëns pour prendre le passage souterrain privé du CERN sous la RD 984.

7.11.3.2

Trafic induit par les chantiers de génie civil

7.11.3.2.1

Déblais

Le volume des déblais produits par les travaux s'élève à 574 000 m³ foisonnés. Grâce aux solutions de proximité trouvées pour les principaux points d'extraction, moins de 5% du volume total sont véhiculés sur des routes passant à proximité d'habitations.

Les 191 000 m³ extraits du Point 1 et déposés sous la ligne 400 kV à Prévessin-Moëns ne sont pas acheminés par la route, mais par une piste de chantier créée spécialement. Les 190 000 m³ extraits du Point 5 sont déposés autour du site. Les 31 000 m³ extraits du Point 6 sont déposés sur des terrains jouxtant les installations actuelles et les déblais du Point 7 sont acheminés au Point 6 par le tunnel LEP.

Les 66 000 m³ du tunnel de transfert TI 2 sont déposés sous la ligne 400 kV. Ils empruntent la route RD 984 et la route VC 5 sur 1 km seulement, hors agglomération, entre le rond-point dit "du CERN" à Saint Genis-Pouilly et la zone de dépôt. Les 51 000 m³ du tunnel de transfert TI 8 sont également déposés sous la ligne 400 kV. Ils empruntent la route RD 35 sur 1 km puis la route VC 5 sur 1 km, le tout hors agglomération.

Les 23 000 m³ de déblais extraits des Points 2, 4 et 8 sont les seuls qui aient à transiter en périphérie d'agglomérations. Leur extraction s'effectue au cours de l'année 2001. Il faut 1 800 transports étalés sur près d'une année soit environ 14 camions par jour répartis sur différents axes routiers.

7.11.3.2.2

Béton

Le tableau 7.9 donne le volume des bétons à couler aux différents points. Il est difficile de faire une évaluation précise des transports de béton car le choix de l'implantation des centrales de production dépend des entreprises adjudicataires des trois lots. En fonction de leurs calculs économiques, celles-ci ont le choix d'implanter chacune une centrale sur son site principal, d'exploiter ensemble une seule centrale, ou bien d'utiliser les centrales existantes à Segny, Crozet, Thoiry en France et à Meyrin en Suisse. Pour l'évaluation du trafic des camions-toupies, c'est cette dernière hypothèse qui a été retenue, bien qu'elle soit la plus pessimiste. En effet, si par la suite les entreprises décident d'avoir une centrale de production sur le site, le trafic est alors limité au transport des agrégats.

Les ouvrages de surface ne représentent qu'un quart du volume total des bétons à couler et sont répartis aux différents points d'accès tout autour de l'anneau. Ce sont les ouvrages souterrains qui nécessitent la mise en œuvre des volumes de béton les plus importants. Ils représentent à eux seuls les trois quarts du volume total.

Pour le bétonnage des ouvrages souterrains du Point 1, les travaux s'étalent entre 1999 et 2003 et ce sont en moyenne 18 camions par jour qui empruntent la RC 6 (dite route de Meyrin) avec une pointe de 90 camions par jour pendant un mois.

On suppose que les ouvrages souterrains du Point 5 à Cessy sont alimentés par la centrale à béton de Segny. Compte tenu de la durée du chantier qui s'étale de 1999 à 2003, le trafic moyen est de 18 camions par jour. Toutefois, ce trafic n'est pas régulier.

Les chantiers des tunnels de transfert TI 2 et TI 8 sont supposés être alimentés depuis les centrales à béton de Thoiry et Crozet. Le bétonnage durant environ un an, c'est un trafic moyen de 40 camions par jour qui en résulte, pour moitié sur la route RD 984 puis la RD 35 et pour l'autre moitié sur la route RD 35a puis la RD 35.

Pour la construction des absorbeurs de faisceaux au Point 6 à Versonnex, il faut compter environ 10 camions par jour en 2002 et 2003 compte tenu de l'étalement du chantier dans le temps. Ces camions empruntent les routes VC 8 (Cessy), RD 15g et RD 15b.

Les ouvrages aux Points 1.8, 2, 3, 4 et 8 nécessitent des volumes moindres de béton. Le trafic induit sur les différentes routes d'accès reste inférieur à quatre transports par jour.

Tableau 7.9

Volume des bétons à couler en m³

	En souterrain	En surface	Total
Point 1	34 700	10 600	45 300
Point 1.8	0	9 800	9 800
Point 2	5 300	500	5 800
Point 3	0	600	600
Point 4	700	1 700	2 400
Point 5	37 800	12 400	50 200
Point 6/Point 7	10 300	2 000	12 300
Point 8	4 100	2 200	6 300
TI 2	18 100	2 100	20 200
TI 8	14 200	0	14 200
Total	125 200	41 900	167 100

7.11.3.3

Trafic induit par l'installation des expériences

Dès l'achèvement du génie civil des halles souterraines commence la mise en place de l'infrastructure : ponts roulants, ventilation, refroidissement, installations électriques. Ensuite, les physiciens vont implanter leurs détecteurs, préalablement préparés par modules à la surface. L'ensemble de ces opérations dure environ trois ans. Les transports de matériel sont par conséquent étalés dans le temps. Les nombres donnés ci-après sont des estimations.

Pour l'installation de l'expérience ATLAS au Point 1, des éléments hors gabarit doivent être amenés sur le site. Le nombre de ces transports exceptionnels est évalué à une quarantaine répartie sur un peu plus de deux ans. L'acheminement des divers éléments de l'infrastructure ainsi que du dispositif expérimental nécessite environ 420 transports répartis sur quatre ans.

Au Point 2, l'installation de l'expérience ALICE se déroule en trois étapes. ALICE est de taille comparable aux détecteurs LEP actuels ; on estime que la circulation liée à son installation est comparable au trafic ayant eu lieu pendant la période d'installation des expériences LEP, soit environ 260 transports sur une période de quatre ans. Un nombre réduit de transports spéciaux (environ 20) est nécessaire, notamment pour la livraison des éléments de l'aimant dipôle de 1 000 tonnes.

Au Point 8, l'expérience LHC-B nécessite le démantèlement du détecteur DELPHI du LEP et l'installation d'un nouveau détecteur qui impliquent au total le transport de 5 000 tonnes de matériel, soit environ 320 transports sur une période de quatre ans.

Au Point 5, l'expérience CMS assemble sur place la majorité des détecteurs. Un total de 600 transports étalés sur quatre ans permet d'acheminer les quelque 14 500 tonnes du grand détecteur CMS. La moitié des convois hors gabarit pour les très grandes pièces arrivera très probablement par le col de la Faucille, tandis que les autres convois hors gabarit proviennent des halls de montage des sites de Meyrin ou de Prévessin. Les routes RD 984, RD 35, RD 35a, RD 984c, RD 15c, RN 5, VC 8 et RD 15g sont le passage obligé pour accéder au site.

Tableau 7.10

Transports exceptionnels pour l'installation des expériences

Année	2001	2002	2003	2004
Point 1/ATLAS	0	10	20	10
Point 2/ALICE	6	2	10	2
Point 5/CMS	0	10	20	10
Point 8/LHC-B	6	2	10	2
Total	12	24	60	24

Tableau 7.11

Nombre de transports ordinaires pour l'installation des expériences

Année	2001	2002	2003	2004
Point 1	80	100	120	120
Point 2	50	50	80	80
Point 5	80	180	180	160
Point 8	50	100	70	100
Total	260	430	450	460

En comptant 250 jours ouvrables par année, le trafic total pour l'installation des expériences correspond, pour l'année la plus chargée, à moins de quatre camions par jour.

7.11.3.4**Trafic induit par l'installation de l'accélérateur**

L'installation des composants de l'accélérateur dans le tunnel se fait principalement par le puits PMI 2 à l'extrémité ouest du site de Meyrin du CERN, à proximité immédiate du rond-point dit "du CERN" à Saint Genis-Pouilly.

Les équipements de base arrivent principalement par la route RD 984 en France et la route cantonale RC 6 en Suisse. Ils sont acheminés jusqu'à la zone de montage et d'essais au Point 1.8 à Prévessin-Moëns, face au site de Meyrin. Les aimants testés sont ensuite transportés par la route RD 984 jusqu'au puits PMI 2, par lequel ils sont introduits dans le tunnel. En conséquence, le trafic induit par l'installation de l'accélérateur est considérablement réduit. Les équipements moins sophistiqués, tels que les câbles, les tuyaux et les blocs d'acier pour les absorbeurs de faisceaux, sont livrés directement aux Points 2, 4, 6 et 8.

Dans la mesure du possible, la ligne de chemin de fer Bellegarde/Divonne est utilisée pour acheminer jusque dans le Pays de Gex les 1 300 noyaux des aimants, longs de 16 m et pesant au total près de 40 000 tonnes.

L'installation de l'accélérateur nécessite environ 6 000 transports. En effet, le matériel est livré par des fournisseurs répartis dans toute l'Europe et il est distribué entre le puits d'installation PMI 2 et les Points 2, 4, 6 et 8. Le travail d'installation s'effectue au cours des années 2002 à 2005, soit pendant plus de 600 jours ouvrables au total. Le trafic moyen est ainsi de 20 camions par jour.

7.11.3.5**Trafic durant l'exploitation**

En phase d'exploitation, le trafic est essentiellement lié à la présence de personnel sur les sites des quatre expériences. Comme pour les expériences LEP, le nombre de physiciens et de techniciens présents au même moment est inférieur à une trentaine par site, ce qui entraîne un trafic maximum d'une centaine de véhicules légers par jour. En période de fonctionnement, soit environ huit mois par an, les transports par camion sont rares. Pendant les quatre mois d'arrêt annuel, des transports de matériel par camion ont lieu occasionnellement. Lors du refroidissement de l'accélérateur à la reprise du fonctionnement après l'arrêt annuel, un trafic de 12 camions citernes par jour a lieu pendant deux semaines pour alimenter les Points 1.8, 2, 4, 6 et 8 en azote liquide utilisé pour le pré-refroidissement.

7.11.3.6**Evolution du trafic global dans le temps**

Sur les axes principaux, l'accroissement total du trafic lié au LHC reste inférieur à 1% du trafic actuel en raison du grand étalement du chantier dans le temps.

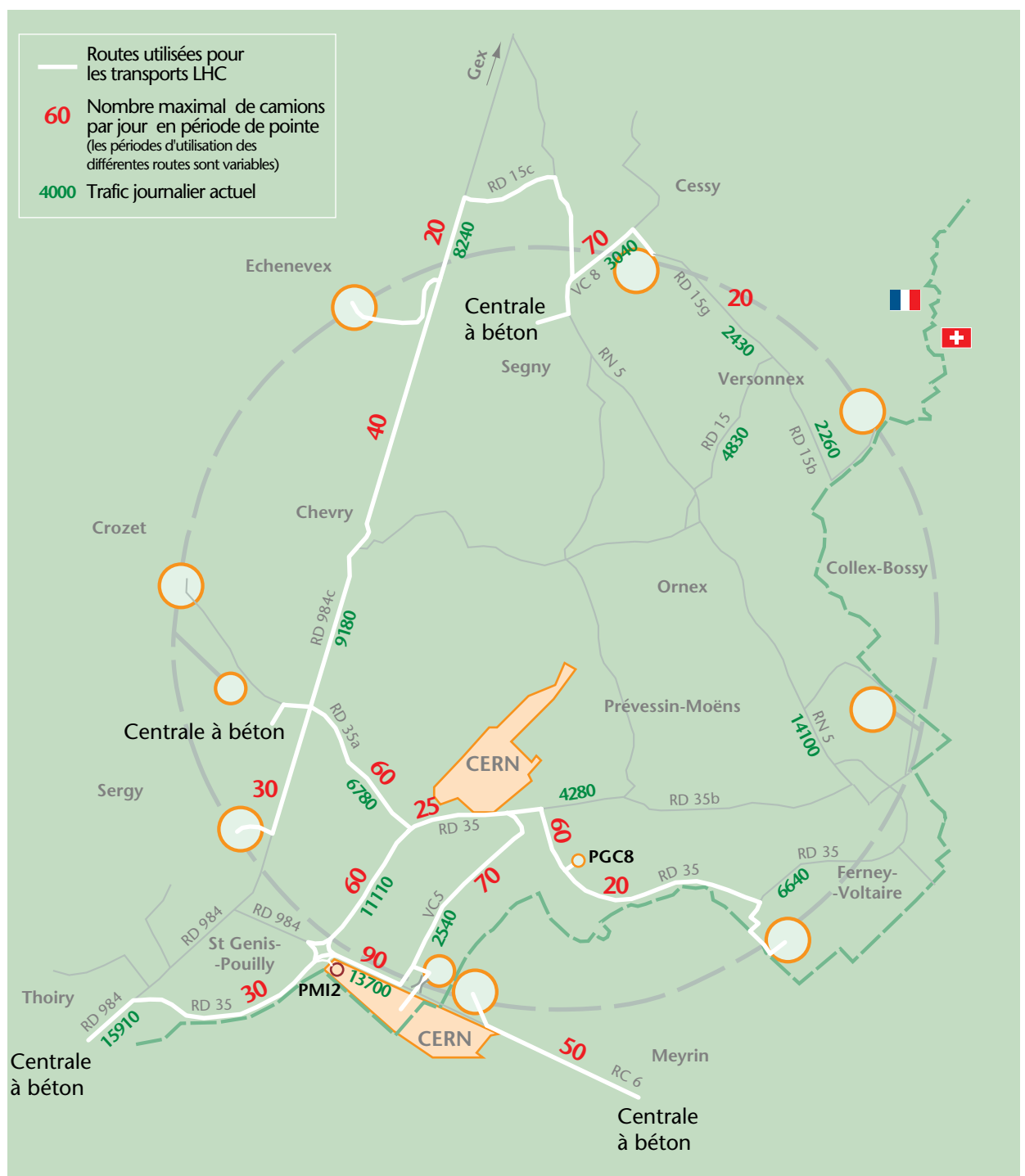


Figure 7.38 Trafic maximum total induit par la construction du LHC

Trafic maximum total induit par la construction du LHC

La figure 7.38 donne le trafic maximum induit par la construction du LHC sur les différents axes. C'est un indicateur qu'il convient toutefois de compléter par une analyse des variations de la circulation dans le temps. En effet, la fréquenta-

tion des routes varie selon le type de travaux effectués et les pointes ne sont atteintes que pendant quelques mois. L'Annexe technique n° 12, "Trafic routier sur les différents axes pendant les travaux de construction et d'installation du LHC" montre en détail l'évolution du trafic pour tous les tronçons de routes concernés. La figure 7.39 montre la répartition du trafic dans le temps sur la route RD 984, qui longe le site de Meyrin du CERN, côté français, tandis que le trafic côté suisse sur la RC 6 est illustré dans la figure 7.40. Le trafic sur la route VC 8 à Cessy est présenté dans la figure 7.41.

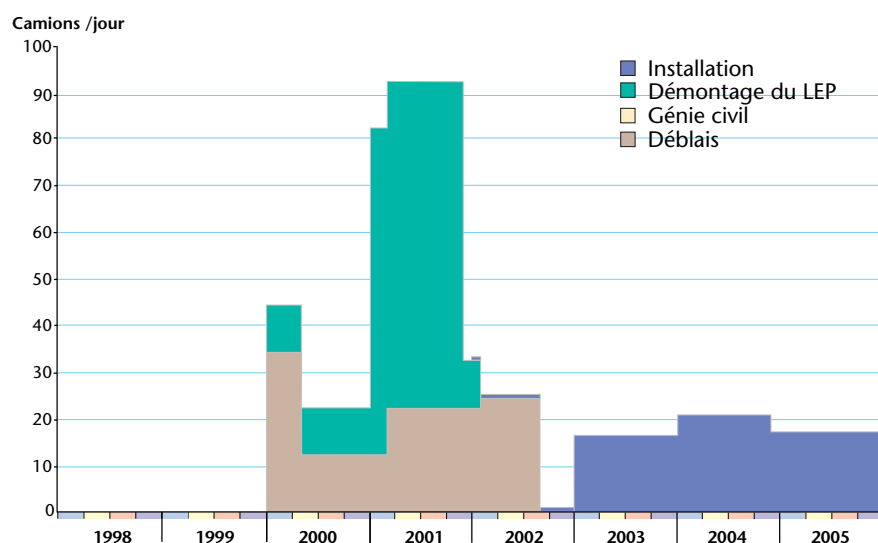


Figure 7.39

Trafic LHC sur la RD 984 entre le rond-point et la route VC 5 de Préveissin

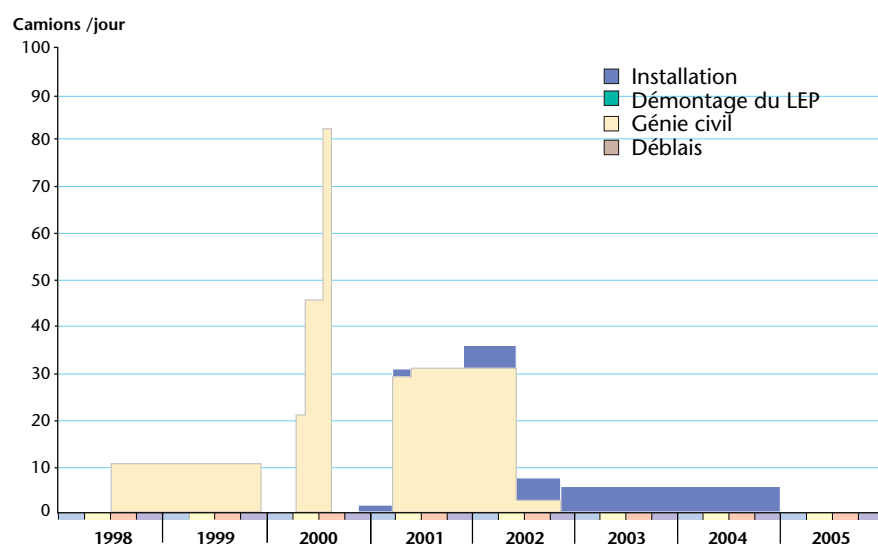


Figure 7.40

Trafic du LHC sur la RC 6 à Meyrin devant le site du CERN

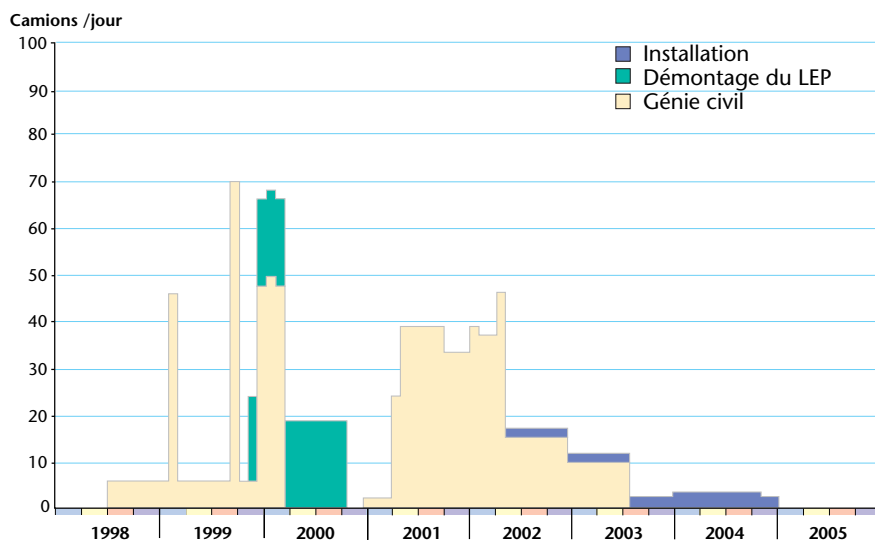


Figure 7.41

Evolution du trafic sur la VC8 à Cessy

7.11.3.7

Impact environnemental des transports

La pollution supplémentaire créée par les transports nécessaires pour la construction du LHC est limitée étant donné son étalement dans le temps. En outre, l'accroissement du trafic est relativement faible puisqu'il représente moins de 1% du trafic actuel sur les axes principaux et environ 2% sur la route VC 8 à Cessy.

7.12

Consommation électrique

L'énergie consommée par le LHC ne peut être séparée de celle du reste du CERN. C'est la raison pour laquelle nous présentons ci-dessous et dans la figure 7.42 l'évolution de la consommation électrique du CERN depuis 1993 et les prévisions jusqu'en 2008.

La période 1993-1996 correspond à la mise en service progressive des cavités accélératrices supraconductrices du programme LEP 200 et de leurs installations cryogéniques associées. Elles n'induisent qu'une légère augmentation puisque les nouvelles cavités installées pendant cette période consomment beaucoup moins d'énergie que les cavités classiques montées à l'origine du projet. De 1997 à 1999, nous assistons à la fin de l'installation de ces cavités supraconductrices. L'augmentation de consommation due à leur mise en service est plus que compensée par l'arrêt d'un certain nombre d'expériences grosses consommatrices d'énergie (Omega, Neutrino, SMC, Violation de CP), puisqu'une légère diminution de la consommation totale est prévue.

A la fin de l'année 1999, le collisionneur LEP est mis à l'arrêt afin de réaliser le démontage de la machine ainsi que les travaux de génie civil décrits au chapitre 4, puis de procéder à l'installation des éléments du collisionneur LHC et des différents détecteurs. C'est la raison pour laquelle la consommation pour l'année 2000 est fortement réduite puisqu'elle correspond à la consommation de base du laboratoire augmentée de la consommation des accélérateurs PS, SPS et de leurs zones expérimentales. L'année 2002 correspond au début des tests des éléments constitutifs du collisionneur, qui se poursuivent jusqu'en 2004.

L'année 2005 correspond à la date prévue de mise en service complète du collisionneur LHC. Le démarrage d'un appareil scientifique d'une telle complexité se fait très progressivement. C'est ainsi que les paramètres ¹ qui entrent directement en compte pour le calcul de l'énergie consommée par année, n'atteignent pas leur valeur nominale avant la quatrième année de fonctionnement, soit en 2008.

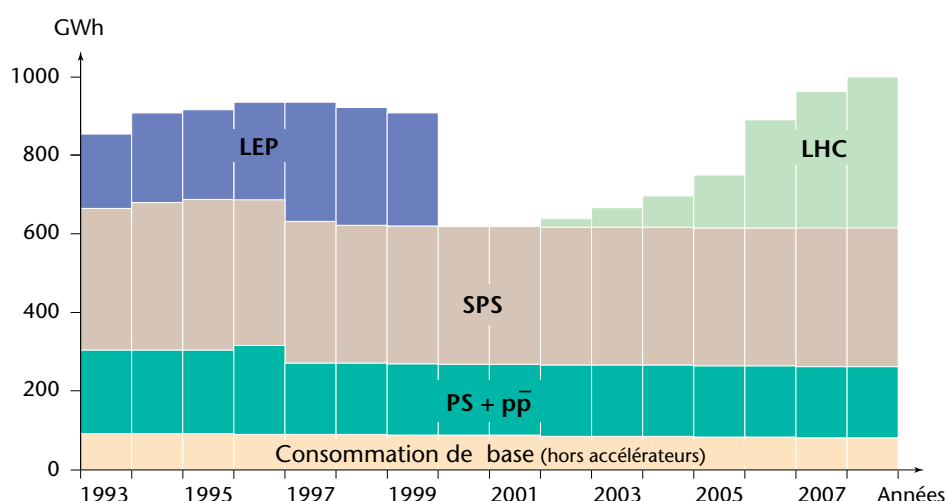


Figure 7.42

Evolution de la consommation électrique du CERN de 1993 à 2008

La consommation électrique prévue en 2008 est à peine supérieure à celle de 1996, alors que le LHC permet des investigations avec une énergie dans le centre de masse supérieure d'un facteur 100 par rapport à l'énergie du LEP. Les choix technologiques et les procédures d'exploitation qui expliquent cette augmentation modeste de l'énergie consommée en regard de l'augmentation des performances de la machine sont exposées au paragraphe 8.9.

1. Energie, luminosité et nombre d'heures de fonctionnement annuel

7.13

Impact foncier

7.13.1

Impact foncier en France

7.13.1.1

Terrains à acquérir en surface

Pour les différents projets antérieurs du CERN, l'Etat français a acquis et mis à la disposition de l'Organisation les terrains nécessaires. Pour le projet ISR (années soixante), 40 ha¹ ont été acquis ; 412 ha ont été acquis pour le SPS (années soixante-dix), et 38 ha pour le LEP (années quatre-vingt). Comparé à ces trois projets, le LHC a un impact foncier minimal. En effet, il réutilise l'infrastructure existante partout où c'est possible. Toutefois, l'acquisition de 18,4 ha complémentaires est nécessaire pour sa réalisation (voir Annexe technique n° 7, "Plans d'occupation des sols, acquisitions foncières et servitudes").

Comme par le passé, ces terrains sont acquis par l'Etat français. Les procédures liées à la déclaration d'utilité publique (DUP) sont utilisées le cas échéant. Suite à la DUP, le Plan d'occupation des sols (POS) de chaque commune concernée est mis en conformité avec la nouvelle affectation des terrains et leur classement est modifié en conséquence. Le tableau 7.12 indique les surfaces à acquérir par commune.

Tableau 7.12

Terrains à acquérir en surface par commune

Commune	Surface (m ²)
Crozet	1 633
Echenevex	7 245
Cessy	156 498
Versonnex	19 510
Total	184 886

Une partie de ces terrains sera rendue à un usage agricole après la construction du LHC s'il est possible de trouver des exploitants.

7.13.1.2

Terrains à acquérir en tréfonds

Bien que le LHC soit un projet de grande envergure, il n'entraîne que peu d'acquisitions en tréfonds (sous-sol) puisqu'il réutilise entièrement le tunnel construit pour le LEP. Seuls 5,3 hectares sont acquis en tréfonds pour couvrir les

1. 1 ha = 10 000 m²

ouvrages souterrains complémentaires (voir Annexe technique n° 7, “Plans d’occupation des sols, acquisitions foncières et servitudes”).

Tableau 7.13

Terrains à acquérir en tréfonds par commune

Commune	Surface (m ²)
Saint Genis-Pouilly	32 400
Versonnex	20 900
Total	53 300

Pendant la construction, les installations de chantier sont toutes situées sur les terrains du domaine du CERN (voir figures 5.8 et 5.9).

7.13.1.3

Servitudes

Une seule servitude est nécessaire pour l’ensemble du projet. Elle couvre le tracé de la canalisation d’évacuation des eaux claires du Point 5 à Cessy, du site du CERN jusqu’à son débouché dans l’Oudar, qui coule au nord-est du site. La figure 8.5 donne le tracé de cette canalisation dont une grande partie peut être aménagée sous forme de simple fossé à ciel ouvert en limite de parcelles.

Tableau 7.14

Servitudes pour canalisations par commune

Commune	Servitude	Longueur ^a
Cessy	Canalisation	250
Versonnex	Fossé à ciel ouvert	800
	Canalisation	200
Total		1 250

a. en mètres linéaires

7.13.1.4

Occupations temporaires

Le projet nécessite l’occupation temporaire de terrains à trois endroits, l’un à Cessy, l’autre à Préveessin-Moëns, le dernier à Saint Genis-Pouilly.

Pour relier le chantier du Point 5 à Cessy à la zone de dépôt des déblais située en contrebas au lieu-dit “Les Mouillets”, les camions empruntent le chemin rural dit “du milieu” qui doit être temporairement élargi afin que les engins puissent se croiser.

L'évacuation des déblais du Point 1 vers la zone de dépôt du Bois de Serves se fait à travers champs jusqu'à la frontière. Puis, les camions circulent sur les terrains en friche situés sous la ligne à très haute tension de EDF jusqu'à leur destination (voir figure 7.31 à la page 270).

La bretelle provisoire de connexion sur le rond-point de la RD 35 à Saint Genis-Pouilly est située sur des terrains appartenant au Département de l'Ain.

Dans les deux premiers cas, le CERN s'efforce de trouver un arrangement à l'amiable avec les propriétaires pour une occupation temporaire des terrains. Faute de quoi, ces occupations temporaires sont réglées par arrêté préfectoral.

7.13.2

Impact foncier en Suisse

Les terrains nécessaires à la réalisation du projet LHC ont été mis à la disposition du CERN par la Confédération suisse à partir de mai 1996.

Les terrains sur lesquels est construite la zone expérimentale d'ATLAS à Meyrin (2,4 ha) étaient déjà frappés d'un droit de superficie en faveur du CERN depuis la construction du SPS dans les années soixante-dix, tandis que 7,3 hectares ont été acquis pour assurer au CERN la maîtrise foncière au-dessus du Point 7, le seul des huit points d'intersection de l'anneau LEP où cela n'était pas le cas.

7.14

Effets sur la faune et la flore

Les ouvrages du LHC ne modifient pas les équilibres actuels puisqu'ils sont réalisés sur les sites existants du LEP. Le seul site où il est nécessaire de déboiser est celui du Point 1.8 pour l'implantation sur environ 1 500 m² des échangeurs atmosphériques et d'une installation d'alimentation électrique (bâtiment SF de la figure 4.26).

Tous les aménagements paysagers prévus comportent des plantations d'essences locales d'arbres et d'arbustes.

Sur les trois sites concernés par les dépôts des déblais, aucune espèce florale notable n'est présente et le dépôt de ces déblais ne nuira donc pas à l'environnement floristique (voir Annexe technique n° 13).

A Cessy, l'impact des travaux sur la faune, particulièrement du dépôt des déblais, est essentiellement transitoire car ces travaux touchent uniquement des parcelles à vocation agricole. En outre, des plantations seront faites sur les plates-formes paysagères aux alentours du site et ce reboisement aura un effet bénéfique à long terme.

Le dépôt des déblais à Prévessin-Moëns est prévu sous la ligne électrique 400 kV, à l'emplacement de la coupe rase réalisée par EDF en août 1988 dans le

bois de Serves et occupe une surface au sol faible en regard de l'ensemble du massif. Une zone de taillis de densité variable s'est développée depuis à cet endroit. Ces taillis attirent notamment des oiseaux de lisière et servent pour le repos, le gagnage et le transit de la grande faune présente. L'impact transitoire lié aux travaux sera donc conséquent. A long terme cependant, l'impact de ces aménagements est réduit. Il a fallu cinq ans à peine pour que la coupe rase d'EDF devienne une zone intéressante pour la faune. La plantation d'arbustes adaptés sur les talus des dépôts permettra de rendre rapidement à cette zone son aspect et sa végétation initiaux.

La surface de la zone de dépôt des déblais de Versonnex (secteur de Bois Chatton/Sous Villars-Dame) est faible. Il s'agit avant tout d'une zone de transit des animaux entre les bois de la Versoix et le Pays de Gex. A long terme, l'impact de ces dépôts est faible. En effet, le secteur actuellement déboisé sera recouvert par les dépôts puis reboisé avec des essences locales (voir chapitre 8). Les différents stades par lesquels passera la végétation offriront une diversification de la futaie.

Pour éviter tout accident, la chasse est interdite pendant le chantier, en particulier autour des trois zones de dépôt des déblais.

7.15

Effets sur la sécurité

Les risques éventuels liés au fonctionnement du LHC peuvent être classés en deux catégories :

- les risques d'origine interne ;
- les risques d'origine externe.

Les risques d'origine interne sont essentiellement les risques radiologiques éventuels, le risque incendie, les risques dus à l'utilisation de gaz inflammables ou de fluides cryogéniques, et enfin les risques dus aux bruits. Les risques d'origine externe à retenir sont limités aux risques éventuels d'inondations des ouvrages ou aux risques d'un séisme.

Même dans ces deux cas, les seules conséquences seraient pour les installations elles-mêmes, mais n'entraîneraient aucune conséquence préjudiciable pour les riverains et l'environnement.

Les risques éventuels sont pris en compte dès la phase d'étude du projet et les principes de prévention sont arrêtés et mis en œuvre dès la conception des installations. En outre, en cas d'incident, le CERN dispose 24 heures sur 24 de moyens d'intervention rapide et d'équipes professionnelles spécialisées.

Comme le LEP, le LHC sera soumis aux dispositions qui régissent les installations nucléaires de base (INB). La procédure INB prévoit notamment dans sa phase

initiale une étude de danger qui identifie les risques éventuels et énonce les principes de prévention. L'étude de danger du LHC fait partie des annexes techniques de cette étude d'impact (Annexe n° 18).

7.16

Impact socio-économique

Le poids économique actuel du CERN est présenté au paragraphe 6.15.4 à la page 222 ainsi qu'en détail dans l'Annexe technique n° 10, "Impact économique régional du CERN".

En résumé, 7 200 personnes ¹ directement liées au CERN vivaient dans la région en 1993 et y dépensaient une grande partie de leurs revenus. De plus, entre 9 000 et 13 000 emplois sont générés localement par les activités de l'Organisation (voir chapitre 6).

7.16.1

Evolution des activités du CERN hors LHC de 1996 à 2005

La construction du LHC doit se faire dans une enveloppe budgétaire en diminution. Elle entraîne l'arrêt ou la réduction de certains programmes de recherche. Par le passé de tels sacrifices ont déjà été consentis, notamment lors de la construction du LEP qui a provoqué l'arrêt de la chambre à bulles BEBC et la fermeture des anneaux de stockage ISR. Cette priorité aux instruments les plus performants permet de transférer le personnel sur les nouvelles activités et de réaliser des économies considérables sur les frais d'exploitation. Ainsi, dès 1997, les expériences utilisant les antiprotons produits par le PS vont s'arrêter ; un peu plus tard la grande halle d'expérimentation ouest du site de Meyrin est libérée des expériences de physique qui s'y déroulent pour être mise à la disposition du LHC. A la fin de 1999, le LEP est arrêté également et son infrastructure adaptée aux besoins du LHC. Néanmoins, le volume global des activités reste important. En effet, pendant les années de construction du LHC, le PS et le SPS continuent quant à eux à alimenter les faisceaux de particules nécessaires pour tester et calibrer les nouveaux détecteurs, ainsi que pour les expériences à basse énergie ISOLDE et les expériences SPS. L'infrastructure technique du CERN (540 bâtiments, 530 000 m² de surface bâtie habitable) doit aussi être maintenue en bon état. La réduction des activités liée à l'arrêt de certains programmes et à une compression générale des frais sont largement compensées par les activités locales spécifiques pour le LHC.

Pendant les années de construction du LHC, le personnel titulaire du CERN diminue progressivement de 2 900 personnes en 1996 à 2 100 personnes en 2005. Cette réduction se fait par le non remplacement des membres du personnel partant à la retraite. Les statistiques montrent que 90% des retraités

1. plein-temps équivalents

du CERN restent dans la région. La diminution des effectifs du CERN ne devrait donc pas engendrer d'effet négatif à moyen terme sur les retombées économiques.

Les personnes prestataires de service en appui industriel sur les sites de l'Organisation constituent une catégorie professionnelle importante pour le bon déroulement des activités du Laboratoire et la maintenance de son infrastructure technique. Etablies localement et principalement en France, les 1 080 personnes concernées en 1996 représentent la partie la plus visible mais aussi la plus sensible des retombées du CERN dans l'économie régionale. En raison de l'arrêt du LEP, l'appui industriel est considérablement réduit entre 1996 et l'an 2000. Cette diminution est en grande partie compensée par les nouvelles activités locales engendrées par le LHC. Le tableau 7.15 montre l'évolution probable du nombre de personnes en appui industriel non lié au LHC. La marge d'incertitude sur ce type de prévision est de l'ordre de plus ou moins 5%.

Tableau 7.15

Evolution du nombre de personnes en appui industriel hors LHC de 1996 à 2005

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Exploitation	960	940	910	880	740	670	670	670	670	670
Projets	120	110	85	60	50	50	50	50	50	50
Total	1080	1050	995	940	790	720	720	720	720	720

7.16.2

Effectifs des entreprises contractantes pendant la construction et l'installation du LHC

La plus grande partie des 11 milliards de francs français du coût du LHC correspond à la fabrication de composants de haute technologie par l'industrie européenne. Toutefois, ces composants sont assemblés, testés et installés localement dans les bâtiments et les ouvrages souterrains spécialement construits pour le projet. Au total, près de 6 000 hommes-années sous contrats industriels sont nécessaires pendant les années 1998 à 2005 pour construire les ouvrages et y installer les équipements techniques. En fonction de la nature des travaux, on estime que ces effectifs sont répartis de la manière suivante :

- 1 730 hommes-années pour exécuter les travaux de génie-civil. Ces travaux débutent au printemps 1998 avec la préparation des plates-formes, suivie du creusement des puits et des tunnels de transfert¹. Le personnel est logé par les entreprises sur les zones d'hébergement mises à leur disposition.

1. dans la mesure où les travaux ne gênent pas le fonctionnement du LEP.

- 1 000 hommes-années pour la mise au point des prototypes et la réception des équipements. Dès 1996, une centaine de personnes en appui industriel est employée annuellement pour les mises au point et essais de prototypes dans les ateliers et bureaux d'études du CERN. Au cours du temps, la nature des activités va changer, passant de la réalisation de prototypes aux tests et contrôles d'équipements. Toutefois, le nombre de personnes en appui industriel employées pour ces activités reste constant.
- 230 hommes-années pour le démontage du LEP et de ses expériences. Ce dernier est indispensable pour libérer l'espace avant l'installation des équipements LHC. Les travaux commencent par la déconnexion des éléments, la récupération et le stockage des composants de haute technologie dès l'arrêt de la machine au début de l'an 2000. Le personnel en appui industriel qui assure actuellement la maintenance du LEP est le plus apte à exécuter ce type de travaux et pourrait être transféré vers cette activité.
- 740 hommes-années pour équiper les ouvrages souterrains et de surface de leurs services généraux et assurer la logistique des transports. Avant d'installer les aimants et les lignes cryogéniques, les sites du LEP existants doivent être adaptés et les nouvelles constructions doivent être équipées de leurs services généraux (éclairage, électricité, réseaux de communication et de contrôle, tuyauteries pour le refroidissement par eau, ventilation, ascenseurs, ponts roulants, etc.). Ces travaux concernent les aménagements du tunnel principal et des halles souterraines existantes, les nouvelles halles d'expérimentation, les tunnels de transfert et les nouveaux bâtiments de surface. Ils impliquent 520 hommes-années. De manière plus générale, les transports de matériel pour l'approvisionnement des chantiers mobilisent un nombre considérable de chauffeurs-grutiers (environ 220 hommes-années). Ces travaux d'équipement font appel à des contrats spécifiques de fourniture et d'installation.
- 890 hommes-années pour réceptionner, installer, souder, tester les aimants et les lignes cryogéniques. Une fois équipées de leurs services généraux, les zones souterraines et de surface sont prêtes à recevoir les composants de l'accélérateur et des expériences préalablement vérifiés et testés. Il s'agit d'installer la ligne d'alimentation d'hélium liquide qui fait le tour de l'anneau, les équipements cryogéniques de production d'hélium liquide, les aimants dans le tunnel principal et dans les tunnels de transfert, les systèmes d'accélération, d'injection et d'extraction des faisceaux, les arrêts de faisceaux, les alimentations électriques, etc. Ce type de travaux fait également appel à des contrats spécifiques de fourniture et d'installation.
- 280 hommes-années pour effectuer la mise en cryostat des aimants supraconducteurs de l'accélérateur. Les 1 300 aimants supraconducteurs qui forment le cœur du LHC sont constitués d'un noyau central en fer feuilleté, appelé "masse froide" car il est refroidi à $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$. La masse froide est installée dans un cryostat pour assurer l'indispensable isolation thermique. Le transport sur de longues distances des aimants assemblés est délicat. C'est pourquoi il est prévu que ces aimants soient assemblés localement par une entreprise contractante spécialement chargée de l'opération.

- 900 hommes-années pour installer les quatre grands détecteurs des expériences. Celles-ci doivent être mises en place avec une grande précision. Non seulement elles représentent une masse considérable de plus de 30 000 tonnes, mais aussi une grande complexité, illustrée par la présence de plus de 200 millions de canaux électroniques. Aux effectifs des contractants, il faut ajouter environ 1 200 hommes-années envoyés par les instituts associés pour assembler et tester les appareillages de physique construits dans leurs laboratoires.

Ces 5 800 hommes-années qui vont travailler localement pour le LHC vont contribuer à l'activité économique régionale en entraînant une intense activité dans la micro-région autour du CERN.

7.16.3

Evolution globale des effectifs industriels

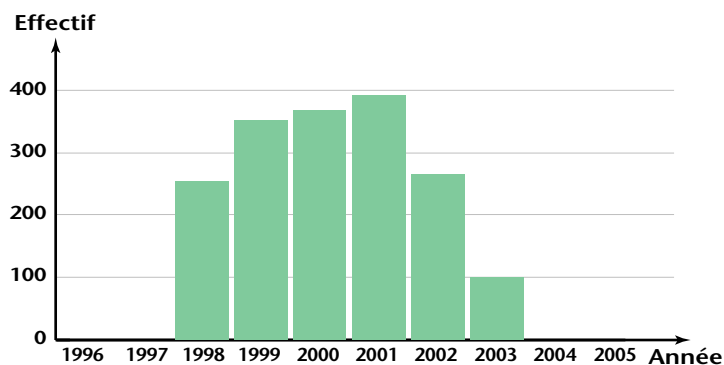
Le tableau 7.16 présente l'évolution probable des effectifs industriels travaillant pour le LHC année par année de 1996 à 2005.

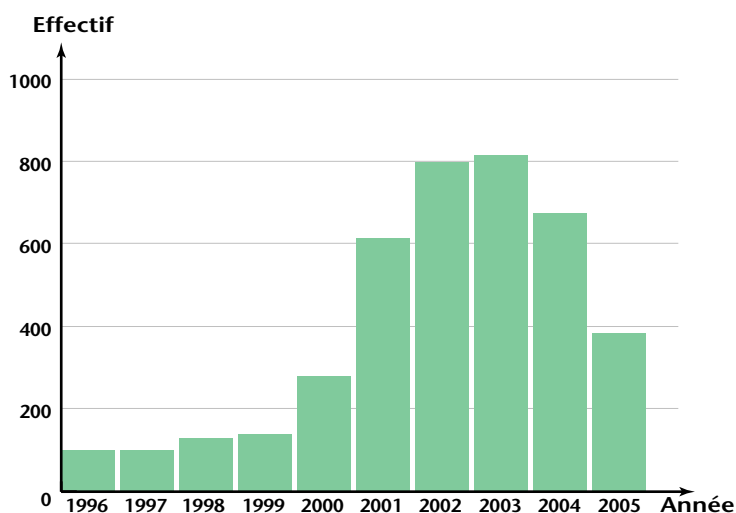
Tableau 7.16

Evolution des effectifs industriels pour le LHC de 1996 à 2005 (en hommes-années)

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Total
Génie civil			250	360	370	390	260	100			1 730
Tests et vérifications	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1 000
Démontage du LEP					75	110	45				230
Install. services généraux			30	30	50	120	200	150	100	60	740
Install. équipés techniques						25	70	70	70	45	280
Installation des aimants				10	35	60	160	270	235	120	890
Montage des détecteurs					20	200	225	225	170	60	900
Total	100	100	380	500	650	1 005	1 060	915	675	385	5 770

L'évolution dans le temps des effectifs industriels pour les travaux de génie-civil, ainsi que pour la préparation et l'installation de l'accélérateur et de ses expériences pendant la période de construction est illustrée par les figures 7.43 et 7.44.

**Figure 7.43****Effectifs nécessaires pour le génie civil**

**Figure 7.44****Effectifs nécessaires pour la construction et l'installation (hors génie civil)**

Compte tenu de l'incertitude des évaluations, estimée à + ou - 15%, les entreprises de génie civil emploieront au maximum entre 300 et 400 personnes pendant la période de pointe. Les travaux liés à la mise en place des équipements techniques nécessitent autour de 700 personnes pendant les mêmes années. Une partie de ce personnel peut être recrutée sur place par transfert de tâches des programmes actuels du CERN vers le programme LHC.

Après sa mise en service en 2005, lorsque le LHC fonctionne de manière stable, en principe à partir de 2006, environ 200 personnes en appui industriel sont impliquées, principalement dans l'opération des installations cryogéniques et des infrastructures techniques telles que la ventilation, le refroidissement, les installations électriques et l'entretien des sites.

La figure 7.45 montre l'évolution de l'ensemble des effectifs industriels, hors génie-civil, tous programmes confondus de 1996 à 2006. Le transfert d'activités du programme LEP vers le programme LHC apparaît comme une transition naturelle. On voit aussi qu'à partir de 2006, avec le LHC en fonctionnement, le nombre de personnes en appui industriel n'est que légèrement inférieur à celui de 1996.

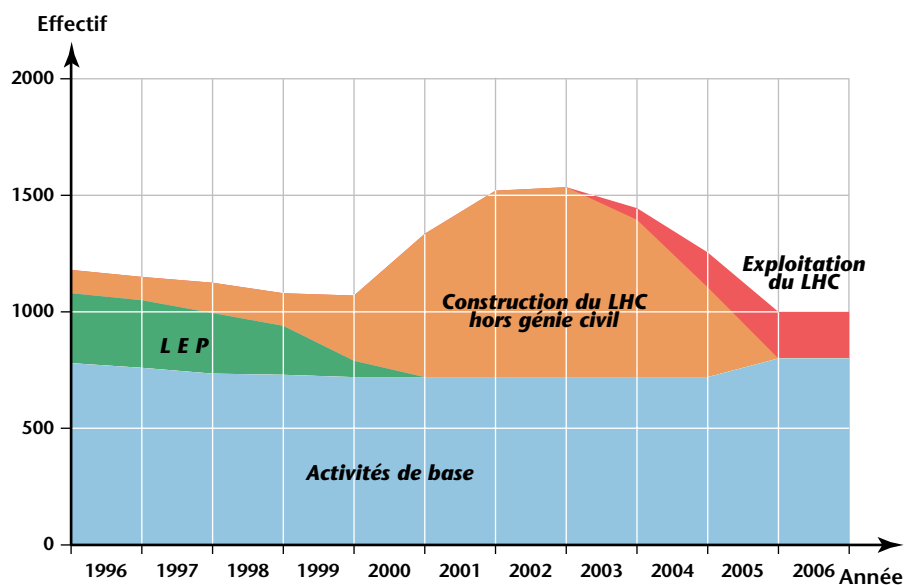


Figure 7.45

Effectifs industriels pendant la construction du LHC (hors génie civil)

7.16.3.1

Répartition socio-professionnelle et besoins en logement

La nature des travaux confiés aux entreprises permet de connaître avec une assez bonne précision le nombre de personnes selon les différentes catégories socio-professionnelles qui sont impliquées localement dans le projet, à savoir :

- 350 mécaniciens, électriciens, électromécaniciens
- 100 chauffeurs, grutiers
- 150 tuyauteurs, soudeurs
- 150 techniciens, géomètres, électroniciens, projecteurs.

Pour le personnel des autres corps de métiers, il convient de noter qu'une centaine de personnes travaille déjà pour le LHC ; 200 personnes actuellement actives sur le programme LEP vont probablement conserver un emploi pour le LHC ; sur les 450 personnes restantes, il est probable qu'environ 150 d'entre elles soient recrutées localement. Il resterait ainsi à loger, en période de pointe, autour de 300 personnes réparties principalement dans l'ensemble du Pays de Gex mais aussi dans le bassin genevois de la Haute-Savoie et accessoirement en Suisse.

On estime que 20% du personnel de génie-civil, soit entre 60 et 80 personnes pendant les années de pointe, pourraient être recrutées sur place et seraient donc déjà logées ; 10%, soit une quarantaine de personnes représentant la maîtrise, viendraient en famille et logeraient en appartements. Le personnel ouvrier des chantiers souterrains se déplace en général seul et est logé par les entreprises dans des foyers pour travailleurs sur les sites réservés par le CERN à cet effet.

Dans la mesure où il est possible d'extrapoler à partir des comportements constatés lors de la construction du LEP, les besoins des 300 à 350 personnes en déplacement et pas encore logées correspondraient à :

- 140 chambres d'hôtels ou chambres meublées;
- 140 appartements ou villas;
- 20 lits dans des foyers pour travailleurs;
- 50 emplacements pour caravanes.

Les capacités locales d'hébergement devraient suffire à recevoir cet afflux relativement modeste de travailleurs. En ce qui concerne les emplacements pour les caravanes, le CERN viabilisera le moment venu, soit un de ses terrains, soit un terrain mis à disposition par une commune (voir figures 5.10, 5.11 et 5.12). Lors de la construction du LEP, trois communes avaient prêté des terrains au CERN qu'il a équipés à ses frais et que ces communes ont par la suite adaptés en zones d'activités.

7.16.3.2

Scolarité

On estime en première approximation que la moitié des 350 personnes en déplacement sera composée de célibataires, l'autre moitié vivant en couple. En comptant un enfant d'âge scolaire par foyer on aurait :

- 30 enfants en classes maternelles
- 70 enfants en classes primaires
- 70 adolescents en classes secondaires.

Compte tenu de la répartition géographique des hébergements potentiels sur une vingtaine de communes du Pays de Gex mais aussi de la Haute-Savoie, la scolarisation des enfants accompagnant les parents en déplacement ne devrait pas poser de problème.

Deux points importants doivent toutefois être gardés à l'esprit :

- D'une part, suivant la nationalité des entreprises intervenant dans la construction du LHC, les estimations de logement et de scolarité pourraient varier dans de larges proportions. Le CERN exprime du mieux qu'il peut les conséquences du projet en s'appuyant sur l'expérience acquise lors de la construction du SPS et du LEP.

- D'autre part, l'accueil de la population industrielle durant le temps de la construction du LHC est du ressort des entreprises dans le cadre de la législation française ou suisse.

7.16.4

Personnel titulaire et utilisateurs en phase d'exploitation

En période d'exploitation du LHC, le personnel titulaire du CERN est stabilisé autour de 2100 personnes. On peut escompter une augmentation du nombre d'utilisateurs en provenance de tous les continents, le LHC étant pour de nombreuses années l'instrument de recherche le plus performant dans le domaine de la physique des particules. Grâce à lui, l'activité du CERN devrait se maintenir à un niveau élevé pendant toute la durée de son exploitation.

Une fois le LHC en fonctionnement, seules les zones d'expérimentation connaissent une présence permanente de personnel, soit les Points 1 à Meyrin en Suisse, 2 à Sergy, 5 à Cessy et 8 à Ferney-Voltaire.

7.16.5

Effets d'entraînement économique

Le principal effet d'entraînement économique du LHC consiste à amener un supplément notable d'activité dans la micro-région pendant la période de construction et à maintenir ensuite les retombées locales du CERN sensiblement au même niveau qu'aujourd'hui, ce qui n'aurait certainement pas été le cas sans la réalisation du grand collisionneur.

Il sera demandé aux entreprises qui travailleront localement pour le projet de domicilier fiscalement leur chantier sur la commune où se déroule l'activité principale ou bien sur le Technoparc du Pays de Gex. L'assemblage et les essais de composants de haute technologie vont attirer des entreprises européennes qualifiées qui établiront des antennes locales pendant quelques années. Les structures d'accueil et les opérations de promotion prévues dans le cadre du Contrat global de développement du Pays de Gex et du bassin bellegardien inciteront peut-être quelques unes d'entre elles à profiter par la suite des atouts du Pays de Gex.

Des contributions spéciales ont été accordées au projet LHC par la région Rhône-Alpes, les Conseils généraux de l'Ain et de la Haute-Savoie ainsi que par la Confédération helvétique et le Canton de Genève. Ces contributions vont avoir un effet d'entraînement économique local.

- La région Rhône-Alpes va donner la possibilité à une cinquantaine de jeunes ingénieurs et techniciens de participer pendant deux ans aux travaux du LHC. Cette expérience, outre son aspect formateur et valorisant pour la future vie professionnelle de ces jeunes, contribuera à diffuser dans la région le savoir-faire technologique du CERN.
- Le Conseil général de l'Ain finance la construction d'un hall de montage sur le Technoparc-Pays de Gex. Ce hall servira aux essais et au montage de certains composants du LHC, induisant ainsi une activité locale. A la fin de la

période de construction du LHC, ce bâtiment entrera dans le circuit économique normal et pourra être utilisé pour le développement économique régional lié aux activités du CERN.

- Le Conseil général de la Haute-Savoie finance une collaboration entre le Centre de compétence en conception de circuits intégrés (C4I) installé à Archamps et le CERN pour développer et intégrer des circuits électroniques complexes. Cette collaboration rapprochera le monde de la recherche et celui de l'industrie départementale. Elle permettra à terme de diffuser un savoir-faire technologique au niveau local.
- La Confédération helvétique et le Canton de Genève prennent à leur charge la construction du tunnel de transfert TI 8, garantissant ainsi un important volume de travail aux entreprises suisses.

Bien qu'à long terme le projet LHC ne soit pas directement créateur d'emplois industriels, il maintiendra en tous cas les retombées économiques locales actuelles du CERN. Il renforcera l'image scientifique et technologique de celui-ci et attirera des chercheurs du monde entier, contribuant ainsi au rayonnement de la région.

8

Mesures pour éviter, réduire ou compenser les effets sur l'environnement

La réutilisation extensive de l'infrastructure existante présente l'avantage considérable de limiter les effets du projet sur l'environnement. Ainsi, pour les différents sites hormis les Points 1 à Meyrin et 5 à Cessy, les changements sont très faibles : l'impact visuel des nouveaux bâtiments est limité, l'alimentation existante en eau et en électricité est suffisante et, avec le LHC, les eaux rejetées dans le milieu naturel sont de même qualité que les rejets actuels.

Toutefois, la construction et l'exploitation d'un ouvrage produit inévitablement des effets sur son environnement. Le maître d'ouvrage s'attache à supprimer, réduire ou compenser l'effet des nuisances pouvant être occasionnées par la réalisation du projet.

Les mesures prises pour éviter ou réduire les effets du projet sur l'environnement ont déjà été évoquées tout au long des chapitres qui décrivent les ouvrages à réaliser, la conduite des travaux et les divers impacts.

Une synthèse de l'ensemble de ces mesures, ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes sont présentées dans ce chapitre.

8.1

Les bâtiments et leurs abords

Les bâtiments de surface nécessaires au projet LHC, ainsi que leurs abords, sont décrits au chapitre 4 et leur aspect est illustré par les images de synthèse présentées au chapitre 7.

Selon leur implantation, les nouvelles installations sont plus ou moins visibles. Celles des Points 1 et 5 aboutissent à la création de sites analogues à ceux qui existent actuellement aux points d'accès pairs du LEP à Echenevex, Ferney-Voltaire, Sergy ou Versonnex. Les constructions aux Points 2, 4, 6 et 8 ne modifient pas l'aspect général de ces sites. Pour tous les points d'accès, les solutions retenues dans le but de réduire l'impact visuel ou de créer un paysage harmonieux sont fondées sur les critères décrits ci-après.

8.1.1

Situation et orientation des bâtiments

Aux Points 1 et 5, l'implantation du bâtiment principal SX, et par conséquent celle des autres bâtiments du site qui lui sont liés, est fixée par la direction du tunnel et par la position de la halle souterraine où se trouve l'expérience.

Au Point 5, le projet initial prévoyait une implantation inverse de celle finalement retenue, implantation qui présentait plus d'avantages pour le CERN (maintien des bâtiments existants notamment), mais qui rapprochait le bâtiment SX des premières habitations de Cessy.

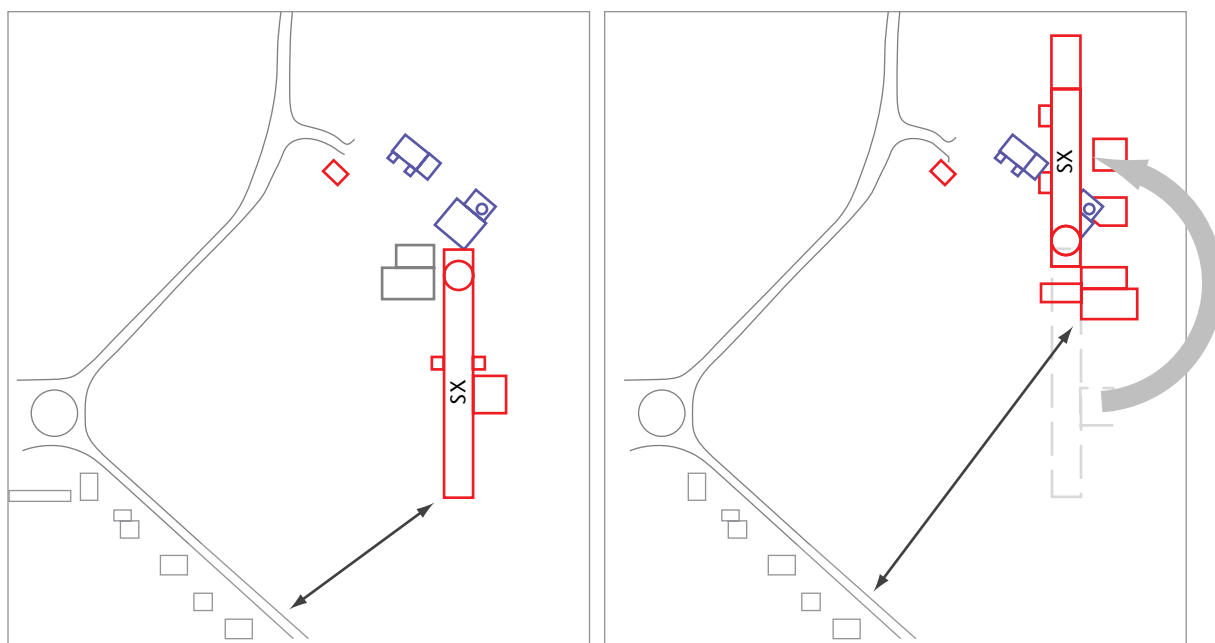


Figure 8.1

Orientation prévue et orientation définitive du bâtiment SX au Point 5

L'implantation finale du bâtiment a été modifiée et la distance par rapport aux habitations les plus proches a été doublée. La figure 8.1 montre schématiquement le changement d'implantation effectué à la demande de la municipalité.

Aux autres points, l'orientation des nouveaux bâtiments a été déterminée par celle des bâtiments existants, comme par exemple au Point 3.3 à Crozet où le nouveau chalet est orienté tout à fait parallèlement à celui déjà construit.

8.1.2

La forme et la volumétrie des constructions

Au Point 5, le bâtiment de montage de l'expérience a fait l'objet d'une réflexion particulière, à cause de ses dimensions et notamment de sa hauteur, 23 m en phase de montage de l'expérience. Une fois ce montage terminé, les dimensions du bâtiment principal SX sont réduites afin de diminuer son impact visuel :

- sa hauteur est ramenée de 23 à 16 m
- sa longueur est ramenée de 141 à 102 m ¹.

Au Point 1, la toiture du bâtiment SX comporte trois plans légèrement inclinés qui atténuent l'effet imposant que ce bâtiment pourrait produire par ses dimensions, tout en introduisant une composante originale. Les bâtiments de ce point sont très groupés, tout en ayant des dimensions et des aspects de façades variés, ce qui contribue à alléger leur apparence.

Pour l'ensemble des autres points, les constructions s'harmonisent avec le bâti existant.

8.1.3

Les matériaux de façade

Le choix des matériaux de façade est en corrélation directe avec la vocation des bâtiments.

L'élément dominant au Point 1 est le grand bâtiment SX. Afin de bien identifier sa fonction de simple enveloppe protégeant les puits contre les intempéries, il est revêtu de lames de bois naturel dont l'essence se maintient dans le temps sans traitement particulier, à l'image de ces hangars à foin, céréales, etc., qui agrémentent la campagne.

Le bâtiment SX du Point 5 est recouvert d'un bardage à larges ondulations posé horizontalement. L'effet de longueur est tranché par une zone de bardage à petites ondulations verticales. Les façades de ce bâtiment comportent également des parties vitrées dont les dimensions sont à l'échelle du bâtiment. Le bardage des autres bâtiments du Point 5 est conçu en harmonie avec celui du bâtiment principal SX.

1. Le bâtiment SXL situé dans l'alignement du bâtiment SX est démonté (voir figures 4.44 et 4.46).

Les bâtiments destinés à abriter des équipements pouvant présenter une nuisance particulière (compresseurs pour la cryogénie, gaz) sont réalisés en béton armé. Compte tenu de leurs grandes surfaces, les façades sont traitées de manière particulièrement soignée, avec les exigences suivantes :

- panneaux délimités par des joints creux et aux dimensions en relation avec l'échelle du bâtiment
- absence de reprise de bétonnage
- état de surface du béton susceptible de recevoir une lasure colorée par exemple
- réalisation d'une partie des panneaux selon des motifs qui créent une animation de surface.

Pour les bâtiments qui n'abritent pas d'installations pouvant être source de nuisances particulières, un bardage en tôle prélaquée a été choisi. La dimension des ondulations et leur position (verticale ou horizontale) sont différentes selon le type de bâtiment et peuvent varier sur un même ouvrage afin d'alléger l'aspect de l'ensemble.

Les bâtiments de contrôle d'accès aux sites et ceux abritant les salles de commande sont traités avec des façades rideaux en verre qui les distinguent et signalent clairement leur fonction.

La diversité des matériaux mis en œuvre, tout en restant limitée, offre une perception harmonieuse de l'ensemble et met en valeur la complexité des sites.

8.1.4

La couleur

En règle générale, la couleur des bâtiments est choisie dans la palette de couleurs des bâtiments du LEP, de manière à préserver l'homogénéité des sites et éviter toute agression visuelle. Les règles applicables dans la région pour ce type de construction sont respectées.

Une attention toute particulière a été portée aux teintes des matériaux de façade sur les sites des Points 1 et 5, moins liés que les autres au bâti existant. Une étude a été menée conjointement par un coloriste et les architectes pour chacun des bâtiments. Les solutions retenues répondent, selon les sites, à l'un au moins des objectifs suivants : intégration des bâtiments dans le site par mimétisme, intégration des bâtiments dans le site par différenciation, mise en valeur des bâtiments.

8.1.5

Les mouvements de terrain et les plantations

Un effort important dans ce domaine avait été fait dans le cas du projet LEP. C'est ainsi que près de 10 000 arbres et arbustes ont été plantés autour des différents sites. Dans le cas du projet LHC, les terrains avoisinant les zones des Points 1 et 5 font l'objet d'un modelage ou du renforcement d'un relief existant

pour diminuer l'impact visuel des bâtiments. Ces aménagements sont adaptés à chaque site afin de ne pas créer de paysages trop artificiels ; ils sont plantés d'arbres et d'arbustes d'essences locales, et des espaces engazonnés sont créés.

Au Point 5, une partie des déblais est déposée aux alentours immédiats de la zone, et des plates-formes paysagères sont aménagées qui réduisent l'impact visuel des nouvelles constructions. Les aménagements paysagers sont intégrés dans le permis de construire et discutés avec la municipalité lors du dépôt de ce permis. Sur les autres sites, où seules des adjonctions de bâtiments sont programmées, le CERN veille à ce que les dispositions paysagères déjà réalisées soient complétées ou adaptées pour leur conserver leur aspect actuel.

Par ailleurs, les aires sur lesquelles sont construits les bâtiments sont terrassées à la cote la plus proche possible de celle du point le plus bas du terrain naturel correspondant. Cette manière de procéder exclut la présence de talus de remblais dont l'aspect n'est pas toujours apprécié.

8.2

Les réseaux

Un grand effort avait été fait pour que les distributions de fluides du LEP ne constituent pas une gêne visuelle. Il en est de même pour le LHC.

Pour renforcer le réseau électrique existant vers le Point 1 et le Point 5, en vue de l'installation des deux nouvelles zones d'expériences, il est prévu de construire deux lignes électriques (66 kV et 18 kV). Comme pour le LEP, ces réseaux de distribution sont enterrés dans des tranchées de 1,30 m de profondeur (voir figure 4.59 à la page 134).

Il est évident que les évacuations d'eaux pluviales et d'eaux usées, ainsi que les raccordements en eau potable, sont également enterrés.

8.3

Les zones de dépôt des déblais

Le LHC va nécessiter la mise en dépôt de 574 000 m³ de déblais foisonnés. Lors de la construction du LEP, le CERN avait suivi les recommandations de la Commission d'enquête et comblé des déclivités naturelles à proximité des zones de travaux plutôt que des carrières existantes plus éloignées.

Pour le LHC, les lieux choisis répondent à des critères stricts :

- éviter la traversée des agglomérations
- améliorer l'intégration paysagère des sites.

Les zones de dépôt sont situées, dans la mesure du possible, sur des aires où l'impact visuel est faible, en plein accord avec les autorités et les communes concernées. La mise en dépôt des déblais est réalisée avec le plus grand soin, par couches régulières successives régalées sur de grandes surfaces. Des fossés latéraux sont creusés. La terre végétale, initialement stockée, est ensuite répartie sur toute la surface.

8.3.1

Dépôt des déblais à Prévessin-Moëns

Les déblais en provenance des Points 1, 1.8, 2, 3, 4 et 8, ainsi que des tunnels TI 2 et TI 8 (environ 350 000 m³) sont mis en dépôt sous la ligne électrique EDF à très haute tension et répartis en deux volumes dont la hauteur est comprise entre 7 et 10 m par rapport au terrain naturel.

Les différents aménagements projetés s'insèrent dans le programme de mise en valeur du Bois de Serves entamé depuis plusieurs années. Ils dégagent de nouveaux espaces de promenades et de loisirs et rendent accessibles, pour un meilleur entretien, les secteurs les plus délaissés de cette zone boisée. Ces aménagements visent plus particulièrement à :

- intégrer les zones de dépôt dans le paysage environnant
- faire du site un but de promenade
- permettre l'entretien du site afin de lui conserver son attrait pour les promeneurs, en respectant les contraintes imposées par la présence de la ligne électrique EDF.

Afin de respecter ces trois objectifs, le choix s'est porté sur une intégration par différence. Pour chaque plate-forme, les éléments suivants sont prévus (voir figure 8.2 à la page 309) :

- un chemin piéton avec des rampes d'accès à chaque extrémité
- une rigole centrale recueillant les eaux de pluies et réduisant ainsi l'érosion des talus par ruissellement
- une aire centrale avec des bancs
- une aire plus petite, pavée, recevant une table d'orientation
- une aire de stationnement pour des véhicules en bordure de la route de l'Europe.

Chaque plate-forme est plantée de végétaux bas ordonnés selon une trame rigoureuse. Des zones minérales importantes de formes géométriques complètent cet ensemble. Les talus sont habillés de végétation. Le reste du site est engazonné. L'espace autour des pylônes est réservé pour le transit de la faune et un passage médian complémentaire est réalisé.

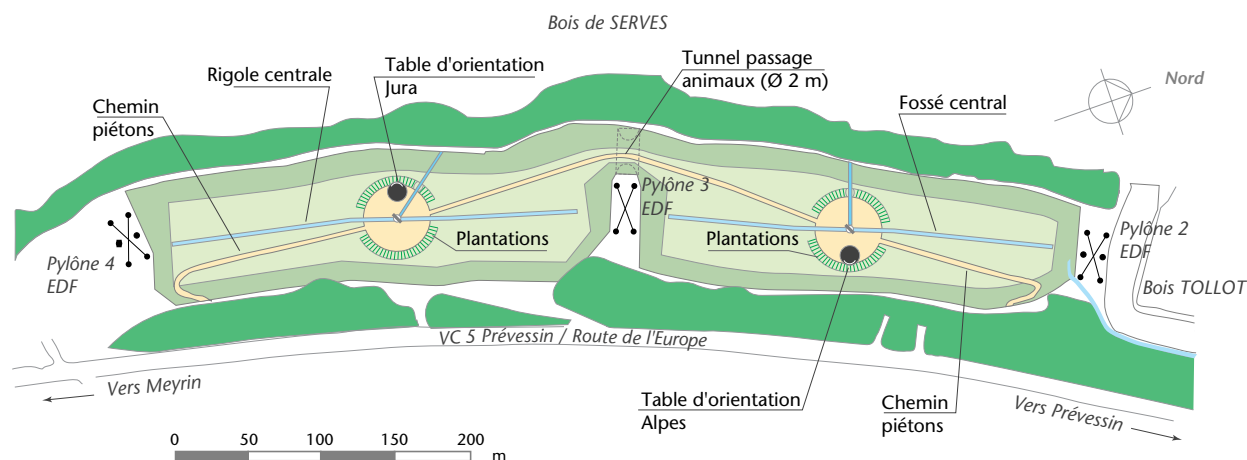


Figure 8.2

Aménagement de la zone de dépôt du Bois de Serves

Les aménagements annexes qui s'inscrivent dans le projet d'amélioration de l'ensemble du réseau hydraulique du Bois de Serves comprennent notamment :

- le recalibrage des fossés provenant de Bois Tollot ainsi que ceux latéraux à la Route de l'Europe (voir figure 8.3 ; n° 1)
- la mise en place d'un ouvrage de régulation permettant d'écarter les débits de pointe à l'amont de la Route de l'Europe (voir figure 8.3 ; n° 2)
- le reprofilage de fossés existants et la création de fossés nouveaux au centre et à l'extrémité sud de la zone de stockage, de façon à évacuer les eaux de surface et autoriser une mise en valeur des zones boisées (voir figure 8.3 ; n° 3)
- la création de deux zones de rétention dans le milieu boisé pour contenir les crues et réguler le débit. Ces bassins utilisent la seule zone de dépression naturelle existante, par où transite le ruisseau principal du Bois de Serves. Ils nécessitent la réalisation de deux digues d'une hauteur maximum de 1,50 m sur une largeur d'environ 8 m et feront découvrir aux promeneurs et cavaliers un parcours aujourd'hui inaccessible, car le sous-bois n'est pas entretenu dans ce secteur. Un fossé latéral évacuera les crues exceptionnelles en cas de remplissage des bassins (voir figure 8.3 ; n° 4).
- le ruisseau principal est élargi et reprofilé à l'aval des zones inondables sur la majeure partie de son tracé (voir figure 8.3 ; entre les n° 5 et 6)
- les canalisations de franchissement de la RD 984 sont modifiées (voir figure 8.3 ; n° 6). Un passage plus large de type dalot, comprenant un radier abaissé et une orientation différente permettent de réduire la surface des terrains actuellement inondés.
- les aménagements précédents sont accompagnés de l'élargissement et de l'approfondissement du ruisseau aval, entre la RD 984 et la douane de Bour-

digny (voir figure 8.3 ; n^{os} 7 et 8). Ces travaux sont primordiaux dans la mesure où ils garantissent l'évacuation des débits captés à l'amont.

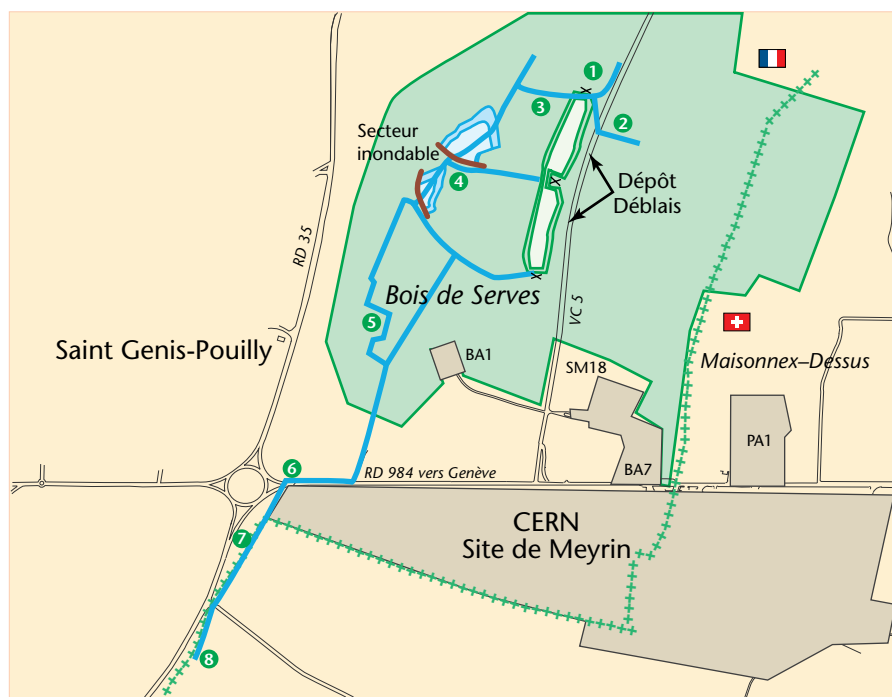


Figure 8.3

Aménagement hydraulique du Bois de Serves

8.3.2

Dépôt des déblais au Point 5 à Cessy

Les deux zones de dépôt des déblais du Point 5 sont situées d'une part à proximité immédiate du site, où ces déblais sont aménagés en plates-formes paysagères, d'autre part au lieu-dit "Les Mouilllets", en contrebas du site du CERN.

Le site prévu pour les dépôts au lieu-dit "Les Mouilllets" possède une capacité d'environ 80 000 m³. Les matériaux à déposer sont de type molassique. En conséquence, la zone est d'abord décapée de sa terre végétale sur une épaisseur minimum de 0,30 m. Cette dernière est stockée pendant la mise en remblais puis redéposée en surface de façon à restituer une zone de prairie. La surface à traiter correspond à environ 4 hectares, divisés en deux parties par un chemin de desserte bordé d'un alignement d'arbres à hautes tiges. Le chemin et les arbres sont conservés.

L'agrandissement du site du Point 5 et la création de ces deux zones de dépôt pour les déblais naturels sont mis à profit pour améliorer l'aménagement hydraulique de ce secteur. La figure 8.4 illustre les actions entreprises. Ces dernières sont résumées ci-après :

- La canalisation existante qui évacue les eaux de pluie et les eaux de drainage de l'ensemble du site du Point 5 (figure 8.4, n° 1) est conservée. Elle est réservée à l'évacuation des eaux pluviales recueillies sur les toitures.
- Les eaux de surface (pluie et drainage) du nouveau site et les eaux de drainage du tunnel sont recueillies dans un ouvrage de décantation enterré (figure 8.4, n° 2).
- En aval du site du Point 5 et de la zone de dépôt des Mouillels, un bassin de rétention avec plan d'eau permanent (figure 8.4, n° 4) est créé. Il recueille les eaux de ruissellement de la zone de dépôt, ainsi que les eaux pluviales du site du Point 5. Ces dernières sont acheminées depuis l'ouvrage de décantation par une canalisation enterrée de 800 mm de diamètre. (figure 8.4, n° 3). Une vue en coupe du plan d'eau ¹ est présentée à la figure 8.5.
- Des fossés latéraux (figure 8.4, n° 5) isolent les ruissellements des zones de dépôt pour les diriger vers le plan d'eau. Celui-ci assure ainsi non seulement la régulation des écoulements provenant du site mais aussi la décantation des eaux superficielles avant leur rejet dans le milieu naturel.
- Un niveau minimum d'eau dans le plan d'eau est assuré grâce à l'apport régulier (quelques litres par seconde) d'eau de bonne qualité en provenance du drainage du tunnel (voir figure 8.5).
- En aval du plan d'eau, un fossé est créé le long du chemin de desserte agricole existant et de la voie communale VC 3 reliant Segny à Versonnex (figure 8.4, n° 6). L'exutoire est ensuite dirigé vers l'Oudar. Il passe sous la RD 15g par une canalisation de 800 mm. La distance d'aménagement depuis le bassin jusqu'au ruisseau est d'environ 1 000 m pour une dénivellation de 11 m. Le fossé transversal qui dessert la ferme voisine, situé à l'actuel point bas, est dimensionné pour recevoir un écoulement prioritaire permanent, mais il ne reçoit pas en cas de crues le supplément d'écoulement provenant de la zone de stockage des déblais.

Le détail de ces aménagements est présenté dans l'Annexe technique n° 7, "Plans d'occupation des sols, acquisitions foncières et servitudes".

L'habitat d'origine de la faune actuelle est préservé grâce à la conservation des haies arbustives et des arbres.

L'aménagement d'un plan d'eau permanent et la restauration des chemins de desserte jusqu'ici abandonnés inciteront les promeneurs à redécouvrir ce site.

Le plan d'eau de régulation et la création de fossés créent un nouvel habitat pour la faune et renforcent la protection hydraulique du secteur, où les inondations se répandent actuellement sur les terrains d'une exploitation agricole.

1. selon l'axe indiqué dans la figure 8.5

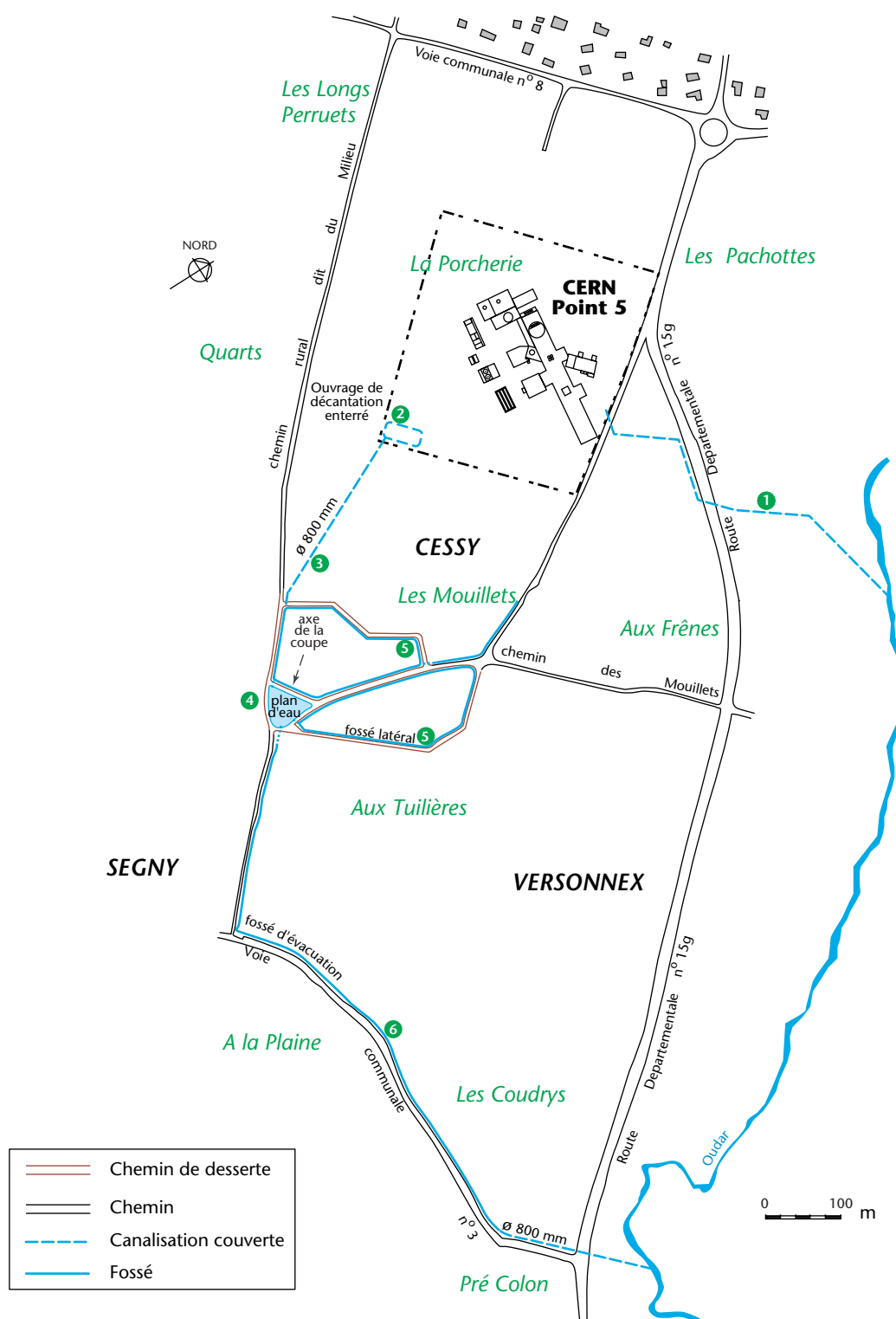


Figure 8.4

Aménagement hydraulique au Point 5

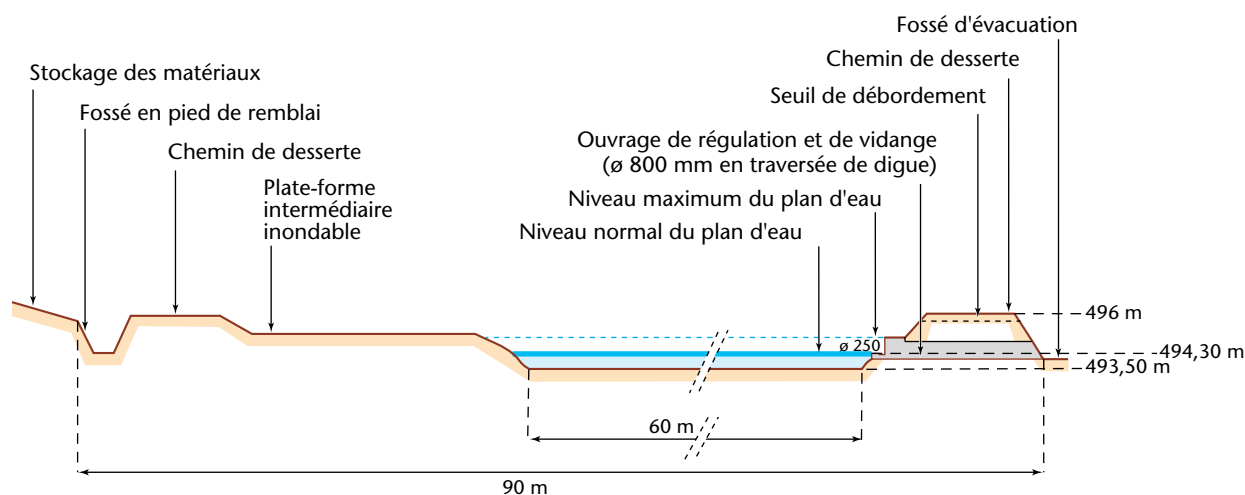


Figure 8.5

Coupe du plan d'eau au Point 5

8.4

Protection de la faune et de la flore

Aucun des aménagements de surface du LHC n'est situé dans une zone protégée au titre de la flore ou de la faune. En ce qui concerne la flore, aucune espèce protégée n'est recensée dans les zones d'aménagement projetées.

La volonté du CERN d'intégrer ses installations dans le paysage et de les insérer dans un environnement végétal le conduit plus à planter qu'à défricher. Dans le passé, plusieurs milliers d'arbres ont été plantés et des espaces verts ont été aménagés sur les sites du CERN. Certains sont d'ailleurs protégés aujourd'hui en raison de leur colonisation par de nombreuses espèces d'orchidées.

Sur le site de Préessin (France), on a réalisé un parc animalier de 1,3 ha, ainsi que l'aménagement d'une zone écologique humide. Au Point 6 du LEP, les eaux de drainage rejetées ont été utilisées pour créer un biotope avec sa flore et sa faune particulières.



Figure 8.6

Biotope du Point 6 au printemps

En ce qui concerne la faune, les aménagements ponctuels sur des superficies limitées ne constituent pas des coupures définitives d'itinéraire dans le déplacement des espèces. Des passages spéciaux sont prévus partout où cela pourrait paraître nécessaire, notamment sur la zone de dépôt des déblais de Prévessin-Moëns. Sur cette zone, des plantations d'arbustes adaptés sur les talus recréera une zone de taillis favorable au transit de la faune. En outre, des réflecteurs de lumière seront posés sur le bord de la route afin de diminuer le nombre de mort d'animaux par accident de la circulation actuellement constaté sur cette route.

Au Point 5, la conservation des haies et la plantation, sur les plates-formes paysagères, d'arbres et d'arbustes adaptés aux besoins de la petite faune permettra de revaloriser l'ensemble du secteur. D'autre part, la création d'un plan d'eau attirera d'autres espèces grâce à la végétation particulière qui se développera sur les berges.

Au Point 6 à Versonnex, le site de dépôt sera reboisé avec des essences locales et passera par différents stades d'évolution avant d'atteindre la futaie. Ces stades offriront une diversification du massif forestier.

Les installations du LHC qui ne sont pas entièrement situées sur des sites existant du LEP se trouvent aux Points 1 et 5 et sont implantées sur des terrains à vocation agricole (prairies ou cultures).

En phase de fonctionnement, les répercussions du LHC sur les espaces naturels peuvent être considérées comme étant d'importance négligeable. Durant l'exécution des travaux, le chantier ne nécessite en principe pas d'abattages d'arbres. Les terres végétales découpées sont inventoriées, mises en dépôt

provisoire sous forme de cordons de faible hauteur qui empêchent leur minéralisation, et sont régaliées en fin de chantier.

8.5

Protection contre les nuisances sonores

8.5.1

Pendant le chantier

Les impacts dus au chantier ont été systématiquement étudiés et le CERN veille de très près à réduire et si possible éliminer les inconvénients créés par les travaux de construction. L'effort porte particulièrement sur les niveaux de bruit émis, en installant des écrans acoustiques et en prenant garde à ce que tous les matériels utilisés soient homologués. En particulier, si les entreprises contractantes décidaient d'implanter une centrale à béton sur les sites, des murs anti-bruit seraient mis en place. En outre, les centrales cryogéniques pour la congélation du sol seront insonorisées.

- **Circulation routière**
Le surcroît de trafic de poids lourds lié aux transports du LHC évite les agglomérations principales du Pays de Gex. Par ailleurs, ce trafic a lieu de jour et en semaine.
- **Engins de chantier**
Les engins de chantier sont conformes aux exigences des divers arrêtés français et règlements de chantiers suisses en vigueur.
- **Tirs de mines et ébranlements**
La majeure partie des ouvrages souterrains est réalisée à l'aide de machines haveuses à tête mobile et d'engins de chantier adaptés à ce type de travaux. C'est le cas pour les puits de grand diamètre, les halles souterraines, les galeries techniques, les galeries de liaison, et éventuellement les tunnels de transfert.

Les tirs de mines sont, en principe, limités aux chantiers de creusement de certains puits, galeries et chambres souterraines. Dans la mesure où ils sont susceptibles de provoquer des bruits perceptibles en surface, ils ont lieu uniquement de jour. Le bruit émis consiste en déflagrations impulsives. Des prescriptions précises sont établies pour l'emploi des explosifs. Elles s'appuient sur les recommandations de l'AFTES (Association Française des Travaux Souterrains) ; elles sont conformes à la législation française pour les travaux exécutés en France et à la législation suisse pour ceux exécutés en Suisse. Le CERN veille à ce que les entreprises exécutant les travaux souterrains prennent toutes les précautions pour éviter les nuisances à l'extérieur des zones de chantier.

Le CERN, comme il l'a fait lors de la construction du LEP, s'assure le concours d'un laboratoire spécialisé indépendant pour l'approbation des plans de tirs

des entreprises, ainsi que pour les contrôles des vibrations en surface. Ce laboratoire le guide également dans la sélection des constructions pour lesquelles des constats préalables apparaîtraient utiles.

8.5.2

Ouvrages en fonctionnement

Le niveau sonore émis par le LHC pendant sa période de mise en service, puis son fonctionnement, sera similaire au niveau sonore actuel du LEP, lui-même inférieur à la limite fixée par le législateur.

Les appareillages bruyants, tels que compresseurs ou groupes électrogènes, sont placés dans des bâtiments munis d'une isolation phonique suffisante pour que le niveau sonore à l'extérieur reste conforme à la norme. Ce type de bâtiment (voir figure 8.7) est déjà utilisé pour certaines installations du LEP. Il a été encore amélioré pour le LHC compte tenu de l'expérience acquise.

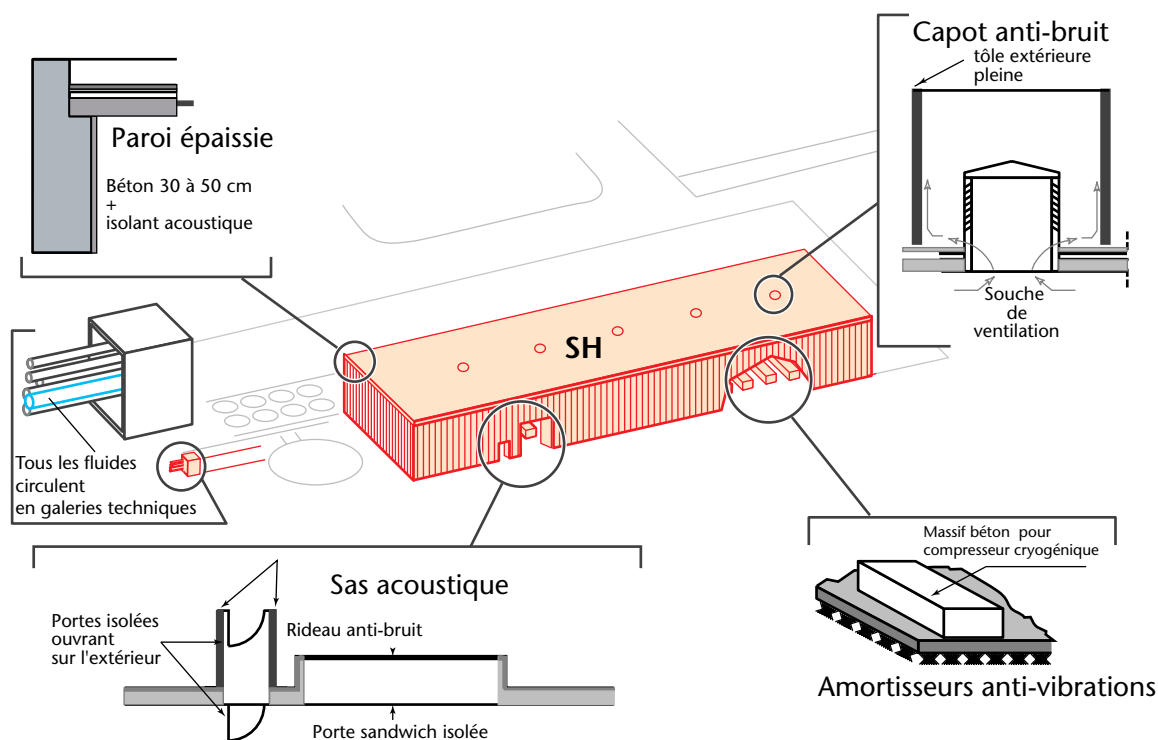


Figure 8.7

Isolation phonique des bâtiments de type SH

8.6

Les aménagements de voirie

La construction du LHC ne nécessite aucun aménagement général visant à adapter le réseau routier, mais des aménagements ponctuels à proximité des chantiers (voir chapitre 7), afin d'assurer la sécurité des changements de direc-

tion et d'effectuer des raccordements sur le réseau existant (RD 15g à Cessy, RD 35 à Saint Genis-Pouilly, carrefour RD 984/VC 5 à Préveessin-Moëns) .

8.7

Protection des ressources en eau

8.7.1

Etudes hydrologiques

Les nouveaux ouvrages souterrains du LHC sont implantés dans la molasse étanche du bassin lémanique, à 100 m de profondeur en moyenne. Seuls les puits d'accès aux ouvrages souterrains traversent des couches quaternaires de surface, dont certaines sont aquifères. C'est la raison pour laquelle l'étude hydrologique effectuée au début des années quatre-vingt a été reprise et complétée, principalement au Point 5 où les moraines aquifères sont très épaisses (voir Annexe technique n° 3). En fait, pour l'ensemble des travaux souterrains du LHC, les réserves d'eau souterraines ne sont rencontrées qu'au niveau du sillon de l'Oudar mais bien en aval des captages de Pré Bataillard ; par ailleurs, aucun captage n'est exploité en aval de la zone de chantier du Point 5.

8.7.2

Précautions prises pendant l'exécution des travaux

Le percement des puits à travers les moraines se fait, lorsque ces moraines sont aquifères comme au Point 5, à l'abri de parois moulées ou d'enceintes congelées. Les puits sont ainsi complètement isolés de la nappe aquifère environnante.

Tous les autres ouvrages souterrains sont réalisés dans la molasse étanche et ne présentent donc aucun risque d'interférence avec les aquifères. Le seul endroit où un ouvrage se rapproche de l'interface moraine-molasse se situe sous le sillon de Saint Genis-Pouilly pour le tunnel TI 2 (voir figure 4.2 à la page 84). Ce secteur a été soigneusement prospecté par sondages (voir figure 6.11 à la page 182). Par mesure de précaution supplémentaire, des sondages à l'avancement seront cependant effectués lors des travaux d'excavation du tunnel TI 2.

Il est à noter qu'aucun ouvrage souterrain du LHC n'est prévu dans le massif calcaire au pied du Jura.

8.7.3

Contrôles physico-chimiques des rejets d'eau

Le CERN s'est engagé, en collaboration avec les services de la DDASS de l'Ain, à contrôler périodiquement la qualité de l'eau souterraine en amont et en aval de la zone des travaux du Point 5. Actuellement, une analyse chimique semestrielle des deux niveaux aquifères est réalisée par les laboratoires de l'Institut Pasteur de Lyon sur des prélèvements effectués par la DDASS.

Pendant les travaux, la fréquence des prélèvements et des analyses sera adaptée à l'activité, en concertation avec la DDASS.

En outre, un état des lieux du niveau des puits en service (publics et particuliers) a été réalisé au printemps 1996 dans la zone du Point 5 (voir Annexe technique n° 3, "Annexes hydrologiques et hydrogéologiques").

Les divers contrôles des eaux rejetées déjà effectués actuellement sont décrits au chapitre 6. Ces contrôles sont maintenus et complétés par les dispositions suivantes :

- mesures en continu au moyen d'un photomètre pour détecter la présence éventuelle d'hydrocarbures aux Points 7 et 8
- modifications des circuits pour permettre un arrêt automatique des rejets si la teneur en hydrocarbures dépasse 10 mg/l. Les stations de mesure sont reliées à la salle de contrôle TCR pour faciliter, le cas échéant, une intervention rapide de la cellule anti-pollution du CERN ; au Point 7, bien que le risque de pollution par hydrocarbures soit très faible, la mesure en continu assure le contrôle de la bonne qualité des eaux dérivées dans le Marquet vers le Nant Gobé pour éviter son assèchement en période d'étiage (voir figure 7.33 à la page 276)
- renforcement du traitement des rejets (décanteur, deshuileur).

8.8

Mesures d'économie d'énergie

Depuis les années soixante-dix, le CERN a mené une politique active d'économies d'énergie. Nous rappelons ci-dessous, avant de décrire les mesures envisagées dans le cadre du projet LHC, les principales économies d'énergie réalisées au cours des 20 dernières années.

8.8.1

Accélérateurs

Environ 70% de l'énergie consommée par le Laboratoire est directement utilisée pour l'exploitation des accélérateurs, des lignes de transfert de faisceaux et des détecteurs de particules.

Dans les premières années de fonctionnement des accélérateurs, la puissance appelée était faible et de nombreuses installations fonctionnaient en continu avec une puissance constante, bien qu'on n'en eût besoin que pendant des périodes limitées pour la saisie des données ; elles pouvaient donc sans perte de rendement être mises hors tension pendant l'arrêt d'un accélérateur.

Toutefois cette coupure de l'alimentation ne constitue en aucune manière un problème simple. Dans certains cas, plusieurs heures sont nécessaires avant que les conditions stables exigées par les expérimentateurs soient atteintes. D'autres

équipements, en particulier les circuits d'électronique rapide utilisés par les détecteurs de particules et leurs équipements associés, sont très sensibles aux courants transitoires de commutation et auraient pu être endommagés lors de la remise sous tension. En fait, il a été nécessaire de leur adjoindre des alimentations sans coupure pour les protéger contre l'interruption de fourniture de courant par le réseau.

Dans certains cas, la mise en œuvre de nouvelles procédures prenant en compte la consommation d'énergie a été suffisante pour réaliser des économies. Dans d'autre cas, l'équipement a dû être modifié. En particulier, les circuits de commande et de régulation des alimentations ont dû être améliorés pour obtenir une meilleure stabilité et une meilleure reproductibilité après la remise sous tension. L'élément clé pour la mise en œuvre pratique de procédures d'exploitation plus rationnelles a été la généralisation de la commande par ordinateur ; grâce à elle, on peut remettre simultanément en service un grand nombre de dispositifs.

Les accélérateurs modernes sont des machines pulsées. Une phase d'accélération de quelques secondes, avec un champ magnétique croissant, est suivie par un palier pouvant durer plusieurs secondes, palier au cours duquel les particules circulent à énergie constante et sont progressivement extraites pour être transférées dans les détecteurs. Lorsque le faisceau a été totalement extrait, le champ magnétique est réduit pour être ramené à sa valeur initiale. Dans le SPS par exemple, le cycle entier dure environ 10 à 12 secondes. Bien que les particules ne soient disponibles que pendant 20% du temps total, on maintenait autrefois en permanence tous les canaux de transfert des faisceaux dans les zones d'expérimentation sous tension. Les alimentations sont maintenant modifiées de façon à permettre une exploitation en mode pulsé, n'excitant plus les aimants que pendant le passage des particules. Lors de la mise en service du LEP, la même politique a été appliquée aux aimants des lignes de transfert entre les différents accélérateurs qui constitueront la chaîne d'injection du LHC.

L'exploitation optimale des grands accélérateurs exige une stabilité mécanique élevée de tous leurs éléments, et donc le maintien d'une température stable avec une régulation dont la précision doit être meilleure qu'un degré C. Au lieu de maintenir une température de 20 °C, il est possible aujourd'hui, grâce à l'amélioration de la commande de correction de l'orbite, d'opérer à 17/18 °C en hiver et à 22/23 °C en été ; cela entraîne des économies importantes en refroidissement et en conditionnement d'air.

D'autres mesures ont également été mises en œuvre sur certains équipements à l'occasion de modifications ou de rénovations : transformateurs à faibles pertes, remplacement des redresseurs par des thyristors, compensation de la puissance réactive, etc. Le fonctionnement en mode pulsé décrit plus haut a également un effet multiplicateur car il réduit corrélativement la puissance nécessaire pour le conditionnement d'air des bâtiments et le refroidissement des équipements.

8.8.2**Supraconductivité**

La supraconductivité, qui est la propriété de certains matériaux d'offrir une résistance pratiquement nulle au passage du courant électrique, est employée au CERN depuis de nombreuses années. L'utilisation de cette technique est la seule manière d'atteindre des champs magnétiques suffisamment élevés. Elle s'accompagne de gains de consommation d'énergie électrique, malgré la nécessité de construire et d'exploiter d'importantes installations cryogéniques destinées à refroidir les éléments supraconducteurs à températures proches du zéro absolu.

8.8.3**Conditionnement d'air et ventilation**

Le refroidissement "naturel" pendant l'hiver a été généralisé. Dans de nombreuses zones (restaurants, salles de conférence, ateliers, sanitaires, etc.), les ventilateurs d'extraction et de renouvellement d'air, qui fonctionnaient auparavant en continu, sont maintenant commandés par des horloges de manière à n'être en fonctionnement que pendant les heures normales de travail. Indépendamment des économies d'énergie électrique, cette modification a diminué de manière sensible la charge de chauffage pendant l'hiver, et se révèle donc doublement bénéfique.

8.8.4**Pompes et distribution de l'eau de refroidissement**

En général, la puissance de pompage installée correspond à la charge maximum. Avec les anciens systèmes de pompage, il fallait recourir à une réduction de pression à travers un diaphragme dissipatif. La mise en service de moteurs à vitesse variable, avec commande d'après le débit, adapte aujourd'hui la consommation d'énergie à la charge réelle.

8.8.5**Eclairage**

Dans les grandes halles d'expérimentation et dans les tunnels abritant les accélérateurs et les lignes de transfert de faisceaux, la commutation de l'éclairage a été couplée au système de sécurité. Les éclairages sont donc automatiquement éteints lorsque l'accélération des faisceaux interdit l'accès du personnel. On a aussi généralisé, lorsque c'était possible, le remplacement des lampes à incandescence par des tubes fluorescents.

8.8.6**Services généraux**

Les services généraux, gros utilisateurs d'énergie, ont fait l'objet d'un examen très approfondi et les mesures énumérées ci-dessous ont été prises.

De nombreuses mesures d'économie ont été prises dans ce domaine : abaissement de la température dans les bureaux et dans les halls ; réduction de la période de chauffage d'environ deux mois ; réduction de la fréquence de renouvellement d'air dans les grands halls ; récupération de la chaleur de l'air

évacué, qui préchauffe l'air frais servant au renouvellement ; important programme d'amélioration de l'isolation thermique de nombreux bâtiments de construction ancienne (façades, toits terrasses, doubles vitrages...) ; optimisation de la centrale thermique par la mise en service d'une installation de cogénération (turbine à gaz pour production continue d'électricité et de chaleur), et par le remplacement des anciennes chaudières à fioul par des chaudières au gaz naturel dont le fonctionnement est plus souple et le rendement meilleur. Ce mode de chauffage est par ailleurs moins polluant, puisque les gaz rejetés contiennent beaucoup moins de composants nuisibles à l'environnement.

En hiver, l'eau chaude pour les usages sanitaires est un sous-produit du système général de chauffage distribuant de l'eau pressurisée. En été, elle doit être fournie par des chauffe-eau électriques locaux. Par mesure d'économie, on a décidé d'interrompre cette distribution estivale d'eau chaude sanitaire dans la presque totalité des bâtiments, mesure qui est pratiquement passée inaperçue des utilisateurs.

8.8.7

Mesures d'économie d'énergie pour le collisionneur LHC

Toutes les mesures présentées ci-dessus sont appliquées aux nouvelles installations souterraines et de surface prévues pour le LHC, notamment les mesures concernant l'éclairage, le chauffage, le conditionnement d'air, la ventilation et la distribution d'eau de refroidissement.

Les lignes de transfert TI 2 et TI 8 entre le SPS et le LHC sont équipées d'aimants résistifs classiques, en tout 352 dipôles et 158 quadripôles. Ces éléments sont pulsés. Les aimants résistifs classiques ont été choisis plutôt que des aimants supraconducteurs car ces éléments ne sont actifs que pendant le temps très court d'un cycle d'exploitation de la machine au moment des transferts. Leur consommation électrique est très faible, bien que la puissance installée soit relativement importante.

L'utilisation extensive de la supraconductivité est la caractéristique principale de ce projet. Pour la première fois, la supraconductivité est utilisée comme principe constructeur des aimants dipôlaire qui servent à courber les faisceaux de particules selon une trajectoire circulaire autour de l'anneau du collisionneur, mais aussi comme principe constructeur des aimants des détecteurs ATLAS et CMS et des cavités accélératrices. La plupart des autres éléments magnétiques du collisionneur (quadripôles, sextupôles, octupôles, décapôles, etc.) sont également supraconducteurs.

Les économies de courant, bien que n'étant pas l'objectif prioritaire, sont une conséquence importante de l'utilisation de la supraconductivité.

L'ensemble des mesures décrites ci-dessus aboutira à un outil d'investigation scientifique d'une puissance 100 fois supérieure à celle dont nous disposons aujourd'hui, pour une consommation d'énergie à peine supérieure (voir figure 7.42 à la page 289).

8.9

Mesures de contrôle

8.9.1

Principes de protection et de contrôle radiologiques

Les exploitants de la machine LHC et le service de radioprotection du CERN ont un intérêt commun à éviter toute perte de faisceau. En effet, une telle perte apporterait de la chaleur aux aimants supraconducteurs et induirait localement de la radioactivité. Les aimants autour de la zone de perte pourraient alors passer de l'état supraconducteur à l'état normal et provoquer l'arrêt de la machine. En limitant les pertes de faisceaux par les collimateurs, les constructeurs du LHC pratiquent une radioprotection active. En effet, les sources de rayonnement diffusés autour de la machine sont quasi inexistantes et le LHC est un accélérateur pratiquement non radioactif.

Etant donné que les pertes de protons dans le LHC sont essentiellement localisées autour des points de collision (expériences), dans la région des collimateurs (nettoyage des faisceaux) et à l'intérieur des blocs absorbeurs, la radioprotection passive est grandement facilitée. Ainsi, les sources de rayonnements à partir des points de pertes de protons, comme les quadripôles "faible bêta" en aval des expériences, ou les collimateurs, sont blindées localement. De telles mesures passives réduisent la diffusion des rayonnements directs et la formation de la radioactivité induite dans l'air et l'eau pour une meilleure protection de l'environnement.

Le système actuel de surveillance et de contrôle radiologiques autour du LEP est complété et renforcé autour du LHC. Ce nouveau programme de contrôle a été conçu pour vérifier en continu que l'influence du LHC sur les niveaux des rayonnements naturels ambiants et sur la radioactivité de l'eau et de l'air reste toujours négligeable.

8.9.2

Contrôle radiologique des rejets d'eau

Actuellement, comme déjà été indiqué plus avant dans cette étude, trois stations de mesure situées sur les collecteurs de sortie du site de Meyrin, deux stations situées sur les collecteurs de sortie du site de Prévessin, et une station située à la sortie des eaux du LEP au Point 1 mesurent en continu l'activité gamma des eaux rejetées vers le Nant d'Avril et le Lion. Dans ces stations, des échantillons sont aussi automatiquement prélevés en continu et collectés une fois par mois pour l'analyse de l'activité bêta totale et de la teneur en tritium.

Une fois par an, des échantillons sont prélevés dans l'Allondon, le Lion, la Versoix et le Nant d'Avril, situés à proximité des Points 1 et 8 du LEP. Sur ces échantillons sont mesurées les activités gamma totale et la teneur en tritium. La radioactivité des précipitations est contrôlée une fois par mois par prises d'échantillons sur les toits des bâtiments 24 et 865.

L'eau de refroidissement ne contient aucun produit nocif. Les rejets d'eau sont mesurés en direct par un scintillateur de haute sensibilité aux rayonnements

gamma et indirectement par un système d'échantillonnages où l'eau récoltée est analysée au laboratoire, notamment pour mesurer sa teneur en tritium. Les moniteurs actifs sont en fonctionnement 24 heures sur 24. Toutes les informations récoltées sont directement transmises dans le service de l'environnement du groupe radioprotection où elles peuvent être interrogées à tout moment.

Le programme actuel de contrôle radiologique des eaux à tous les points de rejet autour du LHC, ainsi que le programme existant de mesure des échantillons pris dans l'environnement à l'extérieur des sites du CERN sont renforcés.

8.9.3

Contrôle radiologique des rejets d'air

Actuellement, chaque site d'accès à la machine est déjà équipé d'au moins une station de mesure pour les rayonnements diffusés neutron et gamma. L'air est analysé en vue de détecter et mesurer une éventuelle radioactivité dans une chambre différentielle. Sa teneur en aérosols est déterminée en le captant sur des filtres qui sont analysés en laboratoire.

Des moniteurs pour mesurer les rayonnements diffusés à chacun des huit points d'accès du LHC seront installés, ainsi que des moniteurs supplémentaires pour les aérosols et des mesures de l'air. Les moniteurs actifs sont en fonctionnement 24 heures sur 24. Toutes les informations récoltées sont directement transmises dans le service de l'environnement du groupe radioprotection où elles peuvent être interrogées à tout moment. Le programme existant de mesure des échantillons pris dans l'environnement à l'extérieur des sites du CERN est renforcé.

8.9.4

Contrôle des rejets atmosphériques

Les installations de refroidissement du LHC sont constituées d'échangeurs atmosphériques fonctionnant selon le principe de la condensation. Le CERN doit construire deux unités d'aéroréfrigérants complémentaires à chacun des Points 1 et 5 pour les besoins des zones d'expérimentation ATLAS et CMS. Ces échangeurs de vapeur n'ont pas d'impact sur le plan climatique, et un impact faible sur le plan visuel puisqu'il produisent uniquement des panaches de vapeur visibles certains jours à la mi-saison¹. Les échangeurs sont équipés de ventilateurs d'extraction à faible vitesse de façon à réduire leur bruit.

8.9.5

Mesures de propreté liées aux chantiers et transports

Pour des raisons d'hygiène et de sécurité, les entreprises contractantes du projet LHC doivent respecter des spécifications de propreté sur leurs aires de chantiers et s'engager à leur conserver un aspect correct. Tous les débris, déchets, poubelles, vieux papiers, etc., doivent être stockés dans les déchetteries prévues à cet effet sur les différents sites, avant leur évacuation selon la réglementation en

1. Les accélérateurs ne fonctionnent pas en hiver.

vigueur. Tout autre rejet est strictement interdit. Par ailleurs, les entreprises contractantes doivent également veiller à la propreté des routes, particulièrement au voisinage des chantiers et des zones de dépôt des déblais, et intervenir dans les délais les plus brefs en cas de besoin.

A la sortie des zones de dépôt des déblais, des systèmes de nettoyage des roues des véhicules ¹ (voir figure 8.8) sont mis en place et les sorties des chantiers sont équipées d'installations complètes de lavage avec bacs de décantation. Enfin, en cas de transports de déblais à forte teneur en eau, des bennes étanches sont imposées pour éviter les projections de boue.



Figure 8.8

Camion avant et pendant le passage sur un décrocteur

8.10

Conséquences d'un séisme

La norme française NFP 06-013 de décembre 1995 (Règles de construction parasismiques PS 92 et annexes) définit quatre zones de sismicité. L'est du département de l'Ain, dont fait partie le Pays de Gex, est situé en zone 1b (sismicité faible).

La norme suisse SIA 160 ² répertorie quant à elle trois zones à risque sismique. Ces zones ont été délimitées sur la base des événements observés jusqu'à nos jours. Le canton de Genève est situé en Zone 1 – sismicité faible. En plus des zones de sismicité, ces normes définissent des classes d'ouvrages et des règles de construction parasismiques. Ces classements, ainsi que les types des ouvra-

1. ou décrocteurs

2. La norme SIA 160 a été fixée en 1989.

En Suisse, la Zone 1 couvre une grande partie du territoire, comprenant le plateau suisse de Genève jusqu'au lac de Constance, la région du Jura ainsi que celle du Tessin.

ges à construire déterminent les accélérations nominales à prendre en compte pour les calculs de dimensionnement de ces mêmes ouvrages.

Pour l'ensemble des ouvrages du projet LHC, les consortiums de bureaux d'études mandatés par le CERN ont donc fondé leurs calculs de structures sur la norme suisse SIA 160 pour les ouvrages du Point 1 et sur la norme française NFP 06-013 pour tous les autres sites.

Il est à noter que la forme cylindrique (ou s'en approchant) des ouvrages souterrains, existants et à construire, est particulièrement favorable en termes de résistance aux séismes.

De plus, les ouvrages souterrains étant confinés dans des terrains stables, ils sont très peu sensibles aux secousses sismiques, sauf dans l'éventualité, hautement improbable, de l'apparition d'une faille sécante.

Le séisme de magnitude 5.2 du 15 Juillet 1996, dont l'épicentre était situé à proximité d'Annecy, l'a confirmé. En effet, il n'a eu aucune conséquence sur les accélérateurs en fonctionnement, dont la sensibilité est pourtant si grande qu'elle est capable de détecter les marées terrestres ou les passages du TGV sur la ligne Genève-Lyon.

8.11

Coûts des mesures pour réduire les effets sur l'environnement

Les coûts des mesures prises pour réduire les effets sur l'environnement (voir tableau 8.1) sont parfois difficiles à évaluer.

Certaines actions sont spécifiquement liées à la protection de l'environnement, comme toutes les mesures prises pendant la durée du chantier ou bien les aménagements paysagers.

D'autres actions sont utiles à la fois pour la protection de l'environnement et pour la conduite des travaux. C'est le cas d'une partie des études préalables, notamment des sondages hydrologiques et géotechniques.

8 - Mesures pour éviter, réduire ou compenser les effets sur l'environnement

Tableau 8.1

Coûts des mesures pour réduire les effets sur l'environnement

Catégorie	Descriptif	kFRF
études préalables	Sondages, études géotechniques et hydrogéologiques, autres études	9 600
	Total études préalables	9 600
mesures prises pendant le chantier	Limitation de l'usage des explosifs pour l'excavation des ouvrages souterrains	6 000
	Renforcement des mesures d'affaiblissement acoustique sur les engins de chantier, les compresseurs, les ventilateurs	400
	Filtres en sortie de ventilation des ouvrages souterrains pour éviter le rejet de poussières	500
	Arrosage des pistes et voies de chantier en période sèche	600
	Broyage et recyclage du béton de démolition	500
	Mise en place de déchetteries de chantier sur chaque site et évacuation des déchets de bentonite vers des décharges agréées	3 600
	Décrotteurs et plates-formes de lavage pour les véhicules de transport des déblais à la sortie des zones de chantier et des zones de dépôt des déblais	700
	Total chantier	12 300
mesures pour les bâtiments	Supplément pour bâtiments anti-bruit	16 000
	Supplément pour traitement spécifique des façades (formes, couleurs, vitrages)	12 000
	Bâtiment SX au Point 5 : • réorientation, démolition et reconstruction d'un bâtiment existant	9 200
	• diminution des longueur et hauteur à la fin de la phase d'installation	16 000
	Bâtiment SX au Point 1 : • décrochés de toiture • bardage extérieur en bois à l'image des bâtiments agricoles voisins	2 000
	Total bâtiments	55 200

Tableau 8.1 Coûts des mesures pour réduire les effets sur l'environnement (suite)

Catégorie	Descriptif	kFRF
mesures pour l'environnement des sites	Installation des gaines et conduites bruyantes dans des galeries enterrées et mise en souterrain de toutes les lignes électriques	11 400
	Aménagements paysagers aux alentours immédiats des Points 1, 5 et 6 (mise en forme, talutage, compactage, couche de terre végétale, plantations) atténuant la hauteur des bâtiments, diminuant l'impact visuel et formant des écrans acoustiques	2 200
	Création et aménagement d'une zone de détente et promenade au Point 5	700
	Aménagements des zones de dépôt des déblais <ul style="list-style-type: none"> • Prévessin (Point 1) • Cessy (Point 5) • Versonnex (Point 6) 	2 800 1 900 100
	Total environnement des sites	19 100
mesures de contrôle et mesures diverses	Contrôles radiologiques renforcés	8 000
	Contrôle continu des hydrocarbures et arrêt automatique des rejets en cas de problème	800
	Au Point 5, vérification en continu de la qualité des eaux et renforcement général des contrôles des rejets d'eaux	100
	Fourniture de 20 m ³ /h d'eau de bonne qualité pour éviter l'assèchement du Nant Gobé en période d'étiage (mesure demandée par la DDAF et la commune de Ferney-Voltaire)	500
	Total mesures de contrôle et des mesures diverses	9 400
Total général		105 600

Le coût total de ces mesures, environ 106 millions de francs français, doit être mis en parallèle avec le coût des travaux de génie civil pour le projet, dont il représente environ 7%, soit 1% du coût total du projet.

Les coûts sont exprimés en milliers de francs français (kFRF) et ont été calculés en utilisant un taux de change de 4 francs français pour 1 franc suisse.

Liste des annexes techniques

1	Statut juridique du CERN et responsabilité en cas de dommages
2	Rapport définitif de sûreté du LEP
3	Annexes hydrologiques et hydrogéologiques <ul style="list-style-type: none">• Carte des bassins versants et cours d'eau du Pays de Gex (Etude LEP)• Inventaire des puits et sources aux environs des Points 2 et 5 de l'anneau du LEP• Etude hydrologique et hydrogéologique globale• Analyse de la qualité des eaux au Point 5
4	Reconnaitances géologiques et géotechniques pour le LHC
5	Impact radiologique du LHC sur l'environnement
6	Mesures des niveaux sonores autour de l'anneau du LEP
7	Plans d'occupation des sols, acquisitions foncières et servitudes
8	Aménagements paysager et hydraulique de la zone de dépôt des déblais de Cessy
9	Aménagements paysager et hydraulique de la zone de dépôt des déblais de Prévessin-Moëns
10	Impact économique régional du CERN
11	Utilisation du programme de simulation FLUKA pour les calculs radiologiques
12	Trafic routier sur les différents axes pendant les travaux de construction et d'installation du LHC
13	Sites de dépôt des déblais : rapport d'expertise floristique
14	Sites de dépôt des déblais : rapport d'expertise faunistique

- 15 Recommandations de l'AFTES concernant les effets sismiques de l'explosif
- 16 Eaux de drainage des puits d'accès : qualité des eaux et impact des rejets sur les cours d'eau récepteurs
- 17 Données de l'Aéroport International de Genève : fréquentation et trafic par couloir aérien
- 18 Etude de danger de l'installation LHC

Glossaire

Accélérateur	machine dans laquelle des faisceaux de particules sont accélérés jusqu'à des énergies élevées. Des champs électriques accélèrent les particules qui sont guidées et focalisées par des champs magnétiques. En dehors de la physique des particules, des accélérateurs sont utilisés pour la fabrication de puces électroniques, la thérapie médicale et même dans les téléviseurs.
Aimant défecteur	aimant servant à dévier les faisceaux de particules qui circulent dans l'accélérateur.
Aimant dipolaire	voir dipôle
Aimant quadripolaire	voir quadripôle
ALARA (principe)	principe de radioprotection. De l'anglais "As Low As Reasonably Achievable", soit niveau le plus bas qu'on puisse raisonnablement atteindre.
ALEPH	l'une des quatre expériences du LEP avec DELPHI, L3 et OPAL.
ALICE	l'une des quatre expériences du LHC avec ATLAS, CMS et LHC-B.
ANDRA	Agence nationale des déchets radioactifs, Parc de la Croix Blanche, 1/7 rue Jean Monnet, 92298 Chatenay-Malabry Cedex. Elle est chargée de la gestion et du stockage des déchets radioactifs solides.
ATLAS	l'une des quatre expériences du LHC avec ALICE, CMS et LHC-B.

Becquerel	unité légale de mesure internationale utilisée en radioactivité. Le becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde. Cette unité représente des activités tellement faibles que l'on emploie habituellement ses multiples : le MBq (méga ou million de becquerels) ; le GBq (giga ou milliard de becquerels) ; 1 curie = 37 milliards de Bq.
Bêta	les particules composant le rayonnement bêta sont des électrons (charge négative) ou des positons (charge positive). Un écran de quelques mètres d'air ou une simple feuille d'aluminium suffisent à les arrêter (symbole β).
Booster	accélérateur intermédiaire entre l'accélérateur linéaire, le LINAC, et le synchrotron à protons, le PS (voir figure 2.4).
Calorimètre	instrument servant à mesurer la quantité d'énergie que possède une particule.
Cavité accélératrice / Cavité radiofréquence	dispositif contenant un champ électrique haute fréquence et qui sert à accélérer les particules dans un accélérateur.
CEA	Commissariat à l'énergie atomique, 31-33 rue de la Fédération, 75015 Paris Le CEA est placé sous l'autorité du Premier ministre.
CIPR	Commission internationale de protection contre les radiations (International Commission of Radiological Protection), Clifton Avenue, Sutton-Surrey, SM2 5PU (Angleterre). Ensemble de personnalités scientifiques de très nombreux pays qui étudient les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme et émettent des recommandations en matière de protection radiologique.
CMS	l'une des quatre expériences du LHC avec ALICE, ATLAS et LHC-B.
Collimateur	système pour limiter les dimensions du faisceau et localiser les pertes de faisceau.
Confinement	dispositif de protection qui consiste à contenir les produits radioactifs à l'intérieur d'un périmètre déterminé fermé.
Cryogénie	étude et production des températures extrêmement basses.
Cryostat	réipient réfrigéré servant à maintenir des températures extrêmement basses.
Déchets radioactifs	matières radioactives inutilisables provenant de centres médicaux, de laboratoires ou de l'industrie nucléaire.
DELPHI	l'une des quatre expériences du LEP avec ALEPH, L3, et OPAL.
Détecteur	dispositif servant à mesurer des propriétés des particules. Certains détecteurs mesurent la position des traces que laissent les particules, d'autres l'énergie. Ce terme désigne aussi d'immenses installations composites formées de multiples éléments de détection.
Dipôle	aimant possédant deux pôles, comme les pôles nord et sud d'un aimant permanent en fer à cheval. Dans les accélérateurs de particules, les dipôles servent à maintenir ces dernières sur une orbite circulaire.
Dosimétrie	détermination, par évaluation ou par mesure, de la dose de rayonnement absorbée par une substance ou un individu.

DSIN	Direction de sûreté des installations nucléaires, 99 rue de Grenelle, 75007 Paris. La DSIN dépend des ministères de l'Industrie et de l'Environnement. Elle définit la politique générale en matière de sûreté nucléaire et la met en oeuvre.
Echelle subatomique	domaine où les éléments étudiés sont plus petits que les atomes.
Effet Joule	chaleur dissipée dans un conducteur résistant par le passage de courant électrique.
Effluents radioactifs	liquides ou gaz contenant des substances radioactives. Leur activité est réduite par des dispositifs appropriés avant leur rejet ou leur utilisation.
EPA	de l'anglais "Electron-Positron Accumulation Ring", accumulateur d'électrons-positons (voir figure 2.4).
Faisceau	dans un accélérateur, les particules sont rassemblées en un faisceau. Celui-ci peut en contenir des milliers de milliards en chapelet, dont les grains sont appelés paquets. Chaque paquet mesure plusieurs centimètres de longueur, mais seulement quelques micromètres de largeur.
Gamma	rayonnement électromagnétique très pénétrant mais peu ionisant émis par la désintégration d'éléments radioactifs. Des écrans de béton ou de plomb permettent de s'en protéger (symbole γ).
Gaz rares	gaz dépourvus d'affinité chimique et ne donnant aucun composé. Ce sont l'argon, l'hélium, le krypton, le néon et le xénon.
Giga	préfixe qui, placé devant le nom d'une unité de mesure, la multiplie par 1 milliard. Exemple : un gigawatt (GW) correspond à 1 milliard de watts.
Gray	unité légale de dose absorbée (symbole Gy) adoptée par la Conférence internationale des poids et mesures, le 2 juin 1975. L'ancienne unité était le rad (1 gray = 1 joule par kg = 100 rads).
Hadron	nom collectif désignant toute particule sensible à la force forte.
Hall	grand bâtiment servant au montage et à la maintenance en surface des détecteurs des expériences situés en sous-sol.
Halle d'expérimentation	grande salle souterraine abritant les détecteurs des expériences.
Hélium superfluide	il s'agit d'hélium II obtenu par dépressurisation. L'hélium superfluide possède d'étonnantes qualités de fluidité et de capacité calorifique. Il est donc très adapté pour refroidir le LHC à très basse température car il transporte la chaleur sur de longues distances en s'échauffant très peu.
Irradiation	exposition partielle ou globale d'un organisme ou d'un matériel à des rayonnements ionisants. Les valeurs d'irradiation sont plus ou moins différentes suivant les individus et ne sont que des ordres de grandeurs de doses annuelles moyennes. Les spécialistes proposent des valeurs souvent différentes en valeur absolue, mais l'essentiel est l'importance relative de chacune des sources.
Isotopes	éléments dont les atomes possèdent le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons. On recense actuellement environ 325 isotopes naturels et 1 200 isotopes créés artificiellement.

Kilowattheure	unité de mesure de travail et d'énergie correspondant à 1 000 wattheures (symbole kWh), égale à la consommation d'un appareil électrique de 1 000 watts fonctionnant pendant une heure ou de 100 watts fonctionnant pendant dix heures.
Klystrons	tubes radiofréquence
L3	l'une des quatre expériences du LEP avec ALEPH, DELPHI et OPAL.
LEAR	de l'anglais "Low Energy Antiproton Accumulation Ring", anneau d'accumulation d'antiprotons de basse énergie. C'est une machine servant au stockage des antiprotons en vue d'expériences (voir figure 2.4).
LEP	de l'anglais "Large Electron-Positron collider", grand collisionneur électron-positon. C'est à l'heure actuelle le plus grand accélérateur de particules du CERN. Il sera remplacé par le LHC (voir figure 2.4).
LHC	de l'anglais "Large Hadron Collider", grand collisionneur de hadrons, le prochain grand accélérateur du CERN. Il sera installé dans le tunnel du LEP.
LHC-B	l'une des quatre expériences du LHC avec ALICE, ATLAS et CMS.
LINAC	de l'anglais "LINear ACcelerator", accélérateur linéaire.
Matière sub-nucléaire	matière à une échelle plus petite que celle des atomes.
MCHF	millions de francs suisses
MFRF	millions de francs français
Méga	préfixe qui, placé devant une unité de mesure, la multiplie par 1 million. Exemple : 1 mégawatt (MW) = 1 million de watts
MKS	échelle de mesure des séismes qui prend en compte leur puissance et leurs effets.
Modèle standard	assemblage de théories englobant l'ensemble de nos connaissances actuelles sur les propriétés des particules fondamentales.
Neutrino	particule de masse nulle ou très faible, interagissant très peu avec la matière.
OPAL	l'une des quatre expériences du LEP avec ALEPH, DELPHI et L3.
OPRI	Office de protection contre les rayonnements ionisants, 31 rue de l'Ecluse, 78110 Le Vésinet. Créé en 1994 pour remplacer l'ancien SCPRI et dépendant des ministères de la Santé et du Travail, il exerce une triple activité de recherche, de contrôle et enfin d'assistance dans le domaine de la radioprotection. En ce qui concerne les rejets radioactifs liquides et gazeux des installations nucléaires, il est en liaison permanente avec l'exploitant.
Période radioactive	temps nécessaire pour que la quantité d'atomes d'un élément radioactif se soit désintégrée de moitié. La période varie avec les caractéristiques de chaque radioélément : 110 minutes pour l'argon 41 ; 8 jours pour l'iode 131 ; 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238. Aucune action physique extérieure n'est capable de modifier la période d'un radioélément, sauf une transmutation (transformation d'un radioélément en un autre).

Proton	particule composée de trois quarks. Les protons possèdent une charge électrique positive et forment avec les neutrons, électriquement neutres, le noyau atomique.
PS	de l'anglais "Proton Synchrotron", synchrotron à protons. Le PS a été mis en service en 1959. Il est la clé de voûte de l'ensemble des accélérateurs du CERN (voir figure 2.4).
Quadripôle	aimant à quatre pôles servant à focaliser les faisceaux de particules, un peu comme des lentilles en verre focalisent la lumière.
Quark	classe de particules élémentaires. Les quarks sont des particules de matière sensibles à la force forte. Ils sont prisonniers à l'intérieur de particules comme les protons et les neutrons.
Rad	voir gray
Radiation	mot synonyme de rayonnement qui désigne une transmission d'énergie sous forme lumineuse, électromagnétique ou corpusculaire. Lorsque la radiation implique la présence de rayonnements ionisants, elle prend le nom d'irradiation.
Radioactivité	émission spontanée de particules alpha, bêta ou d'un rayonnement gamma. On désigne plus généralement sous cette appellation l'émission de rayonnements accompagnant la fission ou la désintégration d'un élément instable.
Radioélément	toute substance chimique radioactive. Seul un petit nombre de radioéléments existe naturellement : il s'agit de quelques éléments lourds (thorium, uranium, radium, etc.) et de quelques éléments légers (carbone 14, krypton 40). Les autres, dont le nombre dépasse 1 500, sont créés artificiellement en laboratoire pour des applications médicales ou dans les réacteurs nucléaires sous forme de produits de fission.
Radionucléide / Radio-isotope	Isotope d'un élément chimique, émettant des particules. Les radionucléides, aussi appelés radio-isotopes, sont très utilisés en médecine pour la thérapie et l'imagerie : la détection des particules qu'ils émettent permet aux médecins d'observer ce qui se passe à l'intérieur du corps humain.
Rayon X	rayonnement électromagnétique pénétrant, c'est-à-dire traversant relativement facilement les corps matériels, mais peu ionisant. En raison de leur puissance de pénétration, liée au pouvoir d'impressionner les émulsions photographiques, les rayons X sont notamment utilisés en radiologie, en radiothérapie ou en spectrographie.
Rayonnement ionisant	<p>processus de transmission d'énergie sous forme électromagnétique (photons gamma) ou corpusculaire (particules alpha, bêta, neutrons) capable de produire directement ou indirectement des ions en traversant la matière.</p> <p>Les rayonnements ionisants sont produits par des sources radioactives. En traversant les tissus vivants, les ions provoquent des phénomènes biologiques pouvant entraîner des lésions dans les cellules de l'organisme.</p>
Rayonnement synchrotronique	émission d'énergie sous forme de rayonnement γ lumineux, de même nature que le rayonnement émis par les particules dont les trajectoires sont courbées.
Rem	voir sievert

Sievert	unité d'équivalent de dose (symbole Sv) qui permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée donnée. L'équivalent de dose n'est pas une quantité physique mesurable. On l'obtient par le calcul en multipliant la dose absorbée (exprimée en gray) par un facteur de qualité dont la valeur dépend de la nature du rayonnement. Depuis 1965, le sievert a remplacé le rem (1 sievert = 100 rem).
SLHC	sondage hydrogéologique et géotechnique pour le LHC.
Solénoïde	aimant produisant des champs magnétiques longitudinaux.
SPS	de l'anglais "Super-Proton Synchrotron", super-synchrotron à protons. Cet accélérateur, mis en service en 1976, fournit les faisceaux pour de nombreuses expériences du CERN. Il sert aussi à la préparation des faisceaux du LEP et servira plus tard à la préparation de ceux du LHC (voir figure 2.4).
Supraconduction/ Supraconductivité	propriété qu'ont certains matériaux, généralement à très basse température, de transporter l'électricité sans résistance. Un courant électrique lancé dans un circuit parfaitement supraconducteur y circulera éternellement, pour autant que le circuit reste suffisamment froid.
Synchrotron	accélérateur dans lequel le champ magnétique courbant les orbites des particules augmente avec l'énergie de ces dernières. Cette technique permet d'obtenir des orbites circulaires.
Système radiofréquence	système d'accélération des particules.
Température critique	température à laquelle un corps change d'état. Certains matériaux sont par exemple supraconducteurs au-dessous d'une température critique donnée.
Tera	préfixe qui, placé devant une unité de mesure, la multiplie par un billion, c'est-à-dire par un million de millions ou mille milliards. Exemple : 1 terawattheure (TWh) = 1 000 milliards de wattheures (Wh), soit 1 milliard de kilowattheures (kWh).
TI 2, TI 8	tunnels de transfert des protons accélérés dans le PS puis le SPS vers le LHC.
TIS (commission)	commission de l'inspection technique et de la sécurité du CERN.
Transition résistive	passage de l'état supraconducteur à l'état normal.
Tritium	isotope de l'hydrogène, émettant des rayonnements bêta, qui entre dans les effluents des réacteurs à eau (symbole H).
Violation de CP	rupture de symétrie permutant simultanément particule et antiparticule, la gauche et la droite.
Volt	unité mesurant la tension d'un courant électrique (symbole V). Elle correspond à la différence de potentiel qui existe entre deux points d'un fil conducteur parcouru par un courant constant de 1 ampère, lorsque la puissance dissipée entre ces deux points est de 1 watt.
Watt	unité de mesure de puissance (symbole W). Ses principaux multiples sont le kilowatt (kW), égal à 1 000 watts, et le mégawatt (MW) égal à 1 million de watts.

Unités de mesure

Unités de mesure

Unité	Symbole	Observations et unité SI ^a
ampère	A	intensité électrique
bar	bar	pression ; 1 bar = 10 ⁵ Pa
becquerel	Bq	activité radioactive ; durée = s ⁻¹
bel	B	intensité sonore
degré Celsius	°C	température
électronvolt	eV	énergie
gray	Gy	dose absorbée ^b ; 1 Gy = 1 Jkg ⁻¹
hertz	Hz	fréquence
joule	J	énergie
kelvin	K	température thermodynamique
newton	N	force
pascal	Pa	pression ; 1 Pa = 1 Nm ⁻²
pièze	pz	pression ; 1 pz = 10 ³ Pa
sievert	Sv	dose efficace ^a ; 1 Sv = 1 Jkg ⁻¹
tesla	T	champ magnétique
tonne	t	masse ; 1 t = 10 ³ kg

Unité	Symbole	Observations et unité SI ^a
volt	V	tension électrique
watt	W	puissance ; 1 W = 1 J/s

a. SI : système international

b. La dose absorbée et la dose efficace sont toutes deux exprimées avec la même unité SI, le J kg^{-1} . Pour bien distinguer ces deux grandeurs physiques, elles ont reçu des noms différents, le Gray pour la dose absorbée et le Sievert pour la dose efficace..

Multiples et sous-multiples décimaux

Préfixe avant l'unité	Symbole avant l'unité	Facteur de multiplication
téra	T	10^{12}
giga	G	10^9
méga	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
déca	da	10
déci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}

Liste des illustrations

Figure 1.1	Le tunnel du LEP, où va être installé le LHC	3
Figure 1.2	Un des quatre détecteurs du LEP	5
Figure 1.3	Enregistrement d'une collision de particules dans le LEP	6
Figure 1.4	Schéma de décision des projets du CERN	7
Figure 1.5	Marie et Pierre Curie	9
Figure 1.6	Albert Einstein	10
Figure 1.7	Le modèle standard	11
Figure 1.8	Jet de particules dans une chambre à bulles	13
Figure 1.9	Du Big Bang à nos jours	16
Figure 1.10	Simulation de la détection d'une paire quark-antiquark dans le LHC	18
Figure 2.1	Plan incliné du tunnel du LEP	21
Figure 2.2	Ensembles de guidage et croisement des faisceaux aux ISR	23
Figure 2.3	Un réfrigérateur cryogénique du LEP	24
Figure 2.4	Schéma de principe du LHC	25
Figure 2.5	La chaîne des accélérateurs du CERN	28
Figure 2.6	Tunnels de transfert TI 2 et TI 8	29
Figure 2.7	La demi-cellule de la machine LHC	31
Figure 2.8	Le LHC dans le tunnel du LEP	31
Figure 2.9	Coupe transversale d'un dipôle LHC	32
Figure 2.10	Section magnétique droite courte	34
Figure 2.11	Montage du premier quadripôle LHC dans son cryostat de test à Saclay	35
Figure 2.12	Principe du refroidissement des aimants du LHC	36
Figure 2.13	Compresseurs d'un réfrigérateur d'hélium du LEP	37
Figure 2.14	Architecture générale de la cryogénie du LHC	38

Figure 2.15	Ecorché de la chambre à vide du LHC	39
Figure 2.16	Configuration du système d'arrêt de faisceau au Point 6	41
Figure 2.17	Principe de construction des blocs absorbeurs de faisceaux	42
Figure 2.18	Alimentation du CERN en eau de refroidissement	44
Figure 2.19	Ventilation du tunnel LEP/LHC	45
Figure 2.20	Une salle de commande des accélérateurs du CERN	46
Figure 2.21	Alignement au dixième de millimètre d'un aimant quadripolaire du LEP	48
Figure 2.22	Répartition des coûts du LHC pour le CERN par grande famille d'activité	50
Figure 2.23	Planning général des travaux de construction du LHC	51
Figure 2.24	Déroulement des travaux de génie civil du LHC	52
Figure 3.1	Simulation de la détection d'un boson de Higgs	58
Figure 3.2	Perspective éclatée du détecteur ATLAS	59
Figure 3.3	Coupe transversale du détecteur CMS	64
Figure 3.4	Construction modulaire du détecteur CMS	67
Figure 3.5	Vue artistique du détecteur ALICE dans la halle d'expérimentation	71
Figure 3.6	Vue artistique du détecteur LHC-B	73
Figure 3.7	Les utilisateurs du CERN (au 01/01/1996)	76
Figure 4.1	Vue d'ensemble des ouvrages souterrains du LHC	83
Figure 4.2	Plan de situation et profil longitudinal du tunnel de transfert TI 2	84
Figure 4.3	Les ouvrages souterrains autour du PMI 2	85
Figure 4.4	Les ouvrages souterrains autour du PGC 8	86
Figure 4.5	Plan de situation et profil longitudinal du tunnel de transfert TI 8	87
Figure 4.6	Situation générale des absorbeurs de faisceaux	88
Figure 4.7	Absorbeur de faisceau : branche nord-ouest	89
Figure 4.8	Absorbeur de faisceau : branche sud-est	90
Figure 4.9	Profil longitudinal des ouvrages souterrains autour du Point 1	92
Figure 4.10	Zone d'expérimentation ATLAS : coupe verticale perpendiculaire à l'axe du tunnel	92
Figure 4.11	Point 1 : zone d'expérimentation ATLAS, vue axonométrique et vue en plan	93
Figure 4.12	Ouvrages souterrains de la zone d'expérimentation ALICE	95
Figure 4.13	Profil longitudinal des ouvrages souterrains autour du Point 2	95
Figure 4.14	Ouvrages souterrains de la zone d'expérimentation CMS	98
Figure 4.15	Vue en plan de la zone d'expérimentation CMS	98
Figure 4.16	Coupe verticale suivant l'axe A-A de la zone d'expérimentation CMS	99
Figure 4.17	Ouvrages souterrains au Point 8 : vue en coupe	100
Figure 4.18	Ouvrages souterrains au Point 8 : vue en plan	100
Figure 4.19	Profil longitudinal des ouvrages souterrains autour du Point 8	101
Figure 4.20	Les ouvrages souterrains au Point 7	103
Figure 4.21	Exemples de bâtiments existants à ossature métallique et en béton	104
Figure 4.22	Vue aérienne du Point 1	105
Figure 4.23	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 1	106
Figure 4.24	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 1	106
Figure 4.25	Vue aérienne du Point 1.8	108
Figure 4.26	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 1.8	109
Figure 4.27	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 1.8	109
Figure 4.28	Vue aérienne du site du PMI 2	111
Figure 4.29	Plan de masse des ouvrages de surface au PMI 2	112
Figure 4.30	Vue axonométrique des ouvrages de surface au PMI 2	112
Figure 4.31	Vue aérienne du Point 2	113
Figure 4.32	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 2	114
Figure 4.33	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 2	114
Figure 4.34	Vue aérienne du Point 3.2	115
Figure 4.35	Plan de masse de l'ouvrage de surface au Point 3.2	116
Figure 4.36	Vue axonométrique de l'ouvrage de surface au Point 3.2	116
Figure 4.37	Vue aérienne du Point 3.3	117

Figure 4.38	Plan de masse de l'ouvrage de surface au Point 3.3	118
Figure 4.39	Vue axonométrique de l'ouvrage de surface au Point 3.3	118
Figure 4.40	Vue aérienne du Point 4	119
Figure 4.41	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 4	120
Figure 4.42	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 4	120
Figure 4.43	Vue aérienne du Point 5	121
Figure 4.44	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 5 : phase 1	122
Figure 4.45	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 5 : phase 1	122
Figure 4.46	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 5 : phase 2	123
Figure 4.47	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 5 : phase 2	123
Figure 4.48	Vue aérienne du Point 6	125
Figure 4.49	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 6	126
Figure 4.50	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 6	126
Figure 4.51	Vue aérienne du Point 7.1 ; au premier plan, le lycée international de Ferney	127
Figure 4.52	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 7.1	128
Figure 4.53	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 7.1	128
Figure 4.54	Vue aérienne du Point 7.2	129
Figure 4.55	Vue aérienne du Point 8	130
Figure 4.56	Plan de masse des ouvrages de surface au Point 8	131
Figure 4.57	Vue axonométrique des ouvrages de surface au Point 8	131
Figure 4.58	Plan schématique des liaisons électriques enterrées LEP/LHC	133
Figure 4.59	Tranchées-types pour fibres optiques et lignes électriques 66 kV et 18 kV	134
Figure 5.1	Transport des déblais pour stockage en souterrain pour les ouvrages du LEP	138
Figure 5.2	Principe de l'excavation avec congélation du sol	141
Figure 5.3	Exécution d'un puits par la méthode de la paroi moulée	142
Figure 5.4	Excavation de l'une des chambres souterraines du LEP	147
Figure 5.5	Haveuse en action pendant l'excavation du tunnel du LEP	148
Figure 5.6	Tête d'un tunnelier prête pour l'excavation	149
Figure 5.7	Pose de voussoirs derrière le tunnelier pour le tunnel du LEP	150
Figure 5.8	Emplacement des installations de chantier : du Point 1 au Point 3.3	158
Figure 5.9	Emplacement des installations de chantier : du Point 4 au Point 8	159
Figure 5.10	Zone d'hébergement de Cessy	161
Figure 5.11	Zone d'hébergement de Préessin-Moëns	161
Figure 5.12	Zone d'hébergement aménagée du CERN	162
Figure 6.1	Carte de situation	164
Figure 6.2	Températures moyennes et ensoleillement mensuels à Genève-Cointrin de 1970 à 1995	165
Figure 6.3	Humidité relative et précipitations mensuelles à Genève-Cointrin de 1970 à 1995	166
Figure 6.4	Vents enregistrés à Genève-Cointrin de 1982 à 1995	167
Figure 6.5	Variations de la température extérieure aux Points 4 et 8 le 9 février 1996	168
Figure 6.6	Schéma structural et géologie simplifiée	172
Figure 6.7	Carte tectonique du Jura	174
Figure 6.8	Localisation probable des zones instables	176
Figure 6.9	Carte hydrogéologique de la zone des ouvrages du CERN	179
Figure 6.10	Sondages (ou groupes de sondages) effectués depuis 1970	181
Figure 6.11	Sondages hydrogéologiques pour le tunnel TI 2	182
Figure 6.12	Coupe hydrogéologique au niveau du Point 5	184
Figure 6.13	Profil géologique le long de l'axe des absorbeurs de faisceaux	185
Figure 6.14	Points de rejet des eaux pluviales et de drainage des sites LEP	190
Figure 6.15	Le cycle azotique	195
Figure 6.16	Concentrations en ozone au mois de juin entre 1986 et 1994	197
Figure 6.17	Concentrations en dioxyde d'azote au mois de juin entre 1986 et 1994	197
Figure 6.18	Relation entre les unités de mesure radiologiques	200
Figure 6.19	Station de mesures de Meyrin	202

Figure 6.20	Contributions annuelles à l'exposition aux rayonnements en France	203
Figure 6.21	Doses intégrées en 1995 pour différentes communes de la région lémanique	204
Figure 6.22	Niveaux de pression sonore et bruits équivalents	209
Figure 6.23	Orchis pyramidal, que l'on trouve en grande quantité au CERN	212
Figure 6.24	Gentiane jaune sur le Jura	212
Figure 6.25	Cephalanthera longifolia (rare) et Solanum dulcamarum	213
Figure 6.26	Anémone sylvie	214
Figure 6.27	Grand tétras	215
Figure 6.28	Lapin dans la neige	215
Figure 6.29	Chevreuil au printemps	216
Figure 6.30	Asealphe, caractéristique des prairies sèches	217
Figure 6.31	Sanglier	218
Figure 6.32	Canards colverts au printemps au dessus de l'étang du Point 6	219
Figure 6.33	Nombre de frontaliers dans le canton de Genève de 1950 à 1993	221
Figure 6.34	Zones de résidence des personnes directement liées au CERN	223
Figure 6.35	Principales zones d'occupation des sols à proximité du LEP	226
Figure 6.36	Circulation routière : débits journaliers moyens sur une année	228
Figure 7.1	Vue du Point 1.8 actuel côté Meyrin	243
Figure 7.2	Vue du Point 1.8 côté Meyrin après construction de l'aire de stockage	243
Figure 7.3	Vue du Point 1.8 actuel côté Jura	244
Figure 7.4	Vue après construction du bâtiment SMA	244
Figure 7.5	Vue actuelle du site de Meyrin depuis le rond-point de Saint Genis-Pouilly	245
Figure 7.6	Vue après construction des bâtiments SDI et SMI 2	245
Figure 7.7	Vue du Point 2 actuel, côté Saint Genis-Pouilly	246
Figure 7.8	Vue du Point 3.2 actuel, côté Jura	246
Figure 7.9	Vue du Point 3.3 actuel	247
Figure 7.10	Vue du Point 3.3 après construction du nouveau bâtiment	247
Figure 7.11	Vue du Point 4 actuel	248
Figure 7.12	Vue du Point 4 après construction des nouveaux bâtiments	248
Figure 7.13	Vue du Point 5 actuel côté village	249
Figure 7.14	Vue du Point 5 côté village après construction des nouveaux bâtiments : phase 1	249
Figure 7.15	Vue du Point 5 côté village : de la phase 1 ...	250
Figure 7.16	Vue du Point 5 côté village : ... à la phase 2	250
Figure 7.17	Vue du Point 5 actuel côté RD 15g	251
Figure 7.18	Vue du Point 5 côté RD 15g après construction des nouveaux bâtiments : phase 1	251
Figure 7.19	Vue du Point 5 côté RD 15g : de la phase 1 ...	252
Figure 7.20	Vue du Point 5 côté RD 15g : ... à la phase 2	252
Figure 7.21	Vue du Point 6 actuel	253
Figure 7.22	Vue du Point 6 après construction des nouveaux bâtiments	253
Figure 7.23	Vue du Point 7.1, côté lycée international de Ferney-Voltaire	254
Figure 7.24	Vue du Point 7.2	254
Figure 7.25	Vue du Point 8 actuel depuis l'aéroport de Genève-Cointrin	255
Figure 7.26	Vue du Point 8 après construction des nouveaux bâtiments	255
Figure 7.27	Vue du Point 1 actuel (Suisse) côté Meyrin	256
Figure 7.28	Vue du Point 1 après construction des nouveaux bâtiments	256
Figure 7.29	Ligne 66 kV enterrée dans l'accotement de la route d'accès au Point 6 (Versonnex)	257
Figure 7.30	Principaux ouvrages et déblais produits par la construction du LHC	269
Figure 7.31	Principe de la mise en dépôt sous la ligne à haute tension	270
Figure 7.32	Zones de dépôt des déblais et routes utilisées	271
Figure 7.33	Dérivation pour l'alimentation du Nant Gobé	276
Figure 7.34	Un aménagement possible pour la sortie ouest du site de Meyrin	278
Figure 7.35	Aménagement possible pour le carrefour VC 5/RD 984	279
Figure 7.36	Autre possibilité d'aménagement pour le carrefour VC 5/RD 984	279
Figure 7.37	Un aménagement possible de la RD 15g pour l'accès au Point 5 à Cessy	280

Figure 7.38	Trafic maximum total induit par la construction du LHC	286
Figure 7.39	Trafic LHC sur la RD 984 entre le rond-point et la route VC 5 de Préveessin	287
Figure 7.40	Trafic du LHC sur la RC 6 à Meyrin devant le site du CERN	287
Figure 7.41	Evolution du trafic sur la VC8 à Cessy	288
Figure 7.42	Evolution de la consommation électrique du CERN de 1993 à 2008	289
Figure 7.43	Effectifs nécessaires pour le génie civil	298
Figure 7.44	Effectifs nécessaires pour la construction et l'installation (hors génie civil)	298
Figure 7.45	Effectifs industriels pendant la construction du LHC (hors génie civil)	299
Figure 8.1	Orientation prévue et orientation définitive du bâtiment SX au Point 5	304
Figure 8.2	Aménagement de la zone de dépôt du Bois de Serves	309
Figure 8.3	Aménagement hydraulique du Bois de Serves	310
Figure 8.4	Aménagement hydraulique au Point 5	312
Figure 8.5	Coupe du plan d'eau au Point 5	313
Figure 8.6	Biotope du Point 6 au printemps	314
Figure 8.7	Isolation phonique des bâtiments de type SH	316
Figure 8.8	Camion avant et pendant le passage sur un décrotteur	324

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Paramètres techniques du LHC	27
Tableau 2.2	Coût du projet LHC pour le CERN (en millions de FRF).....	49
Tableau 3.1	ATLAS – Paramètres généraux	62
Tableau 3.2	ATLAS - Aimants du spectromètre	62
Tableau 3.3	ATLAS – Instrumentation scientifique	63
Tableau 3.4	CMS – Paramètres généraux	68
Tableau 3.5	CMS – Aimant bobine supraconductrice	68
Tableau 3.6	CMS – Instrumentation scientifique	68
Tableau 3.7	ALICE – Paramètres généraux	70
Tableau 3.8	ALICE - Aimants du spectromètre	71
Tableau 3.9	ALICE – Instrumentation scientifique	72
Tableau 3.10	LHC-B - Paramètres généraux	74
Tableau 3.11	LHC-B - Aimant dipolaire supraconducteur	74
Tableau 3.12	LHC-B - Instrumentation scientifique.....	75
Tableau 3.13	Collaborations dans les expériences du LHC.....	76
Tableau 4.1	Nomenclature des ouvrages souterrains LEP/LHC.....	78
Tableau 4.2	Nomenclature des bâtiments LEP/LHC	79
Tableau 4.3	Ouvrages existants aux Points 1 à 3.3	81
Tableau 4.4	Ouvrages existants aux Points 4 à 8	82
Tableau 4.5	Principaux ouvrages souterrains du tunnel TI 2	85
Tableau 4.6	Principaux ouvrages souterrains du tunnel TI 8	86
Tableau 4.7	Principaux ouvrages souterrains au Point 6	90
Tableau 4.8	Principaux ouvrages souterrains au Point 1	94
Tableau 4.9	Principaux ouvrages souterrains au Point 2	96

Liste des tableaux

Tableau 4.10	Principaux ouvrages souterrains au Point 5	97
Tableau 4.11	Principaux ouvrages souterrains au Point 8	101
Tableau 4.12	Principaux ouvrages souterrains au Point 7	102
Tableau 4.13	Ouvrages souterrains au Point 4	103
Tableau 4.14	Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 1	107
Tableau 4.15	Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 1.8	110
Tableau 4.16	Caractéristiques des ouvrages de surface au PMI 2	111
Tableau 4.17	Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 2	113
Tableau 4.18	Caractéristiques de l'ouvrage de surface au Point 3.2	115
Tableau 4.19	Caractéristiques de l'ouvrage de surface au Point 3.3	117
Tableau 4.20	Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 4	119
Tableau 4.21	Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 5	124
Tableau 4.22	Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 6	125
Tableau 4.23	Caractéristiques de l'ouvrage de surface au Point 7.1	127
Tableau 4.24	Caractéristiques des ouvrages de surface au Point 8	132
Tableau 6.1	Consommation d'eau brute au CERN en 1995	188
Tableau 6.2	Consommation d'eau potable sur les sites du LEP en 1995	189
Tableau 6.3	Eaux de drainage : points de rejet et débits	190
Tableau 6.4	Réactions chimiques potentielles dans le LEP.....	196
Tableau 6.5	Radioactivité initiale en Bq/kg autour des sites du futur LHC	205
Tableau 6.6	Intervalles de référence et valeur critique d'émergence	210
Tableau 6.7	Valeur du terme correctif d'émergence C_E en fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit particulier	210
Tableau 6.8	Nombre de logements locatifs sociaux dans le Pays de Gex de 1990 à 1993	220
Tableau 6.9	Commandes régionales du CERN en 1993 en millions de francs suisses	224
Tableau 6.10	Classes de qualité officielles des cours d'eau en France	230
Tableau 7.1	Normes de radioprotection du CERN et de la CIPR	260
Tableau 7.2	Valeurs de référence de rejets radioactifs annuels par la voie aérienne	260
Tableau 7.3	Valeurs de référence de rejets radioactifs annuels dans les effluents aqueux.....	260
Tableau 7.4	Rejets d'air activé par la ventilation et par les aéroréfrigérants pour des radionucléides de période $t < 1$ jour et $t > 1$ jour en GBq/an.....	263
Tableau 7.5	Inventaire de l'eau activée aux différents points de rejet en GBq/an	266
Tableau 7.6	Inventaire de l'eau activée qui reste contenue dans le souterrain et les circuits de refroidissement de la machine en GBq/an	266
Tableau 7.7	Déblais naturels produits par la construction du LHC	268
Tableau 7.8	Volume et lieu d'extraction des bétons de démolition	272
Tableau 7.9	Volume des bétons à couler en m^3	283
Tableau 7.10	Transports exceptionnels pour l'installation des expériences	284
Tableau 7.11	Nombre de transports ordinaires pour l'installation des expériences	284
Tableau 7.12	Terrains à acquérir en surface par commune	290
Tableau 7.13	Terrains à acquérir en tréfonds par commune	291
Tableau 7.14	Servitudes pour canalisations par commune	291
Tableau 7.15	Evolution du nombre de personnes en appui industriel hors LHC de 1996 à 2005	295
Tableau 7.16	Evolution des effectifs industriels pour le LHC de 1996 à 2005 (en hommes-années)	297
Tableau 8.1	Coûts des mesures pour réduire les effets sur l'environnement	326

Contributions extérieures

Etude géologique des terrains concernés
par les travaux du LHC
Inventaire des puits et sources
aux environs des Points 2 et 5 de l'anneau du LEP

Pr. J.-C. Fourneaux
*U.F.R. de géologie et de minéralogie,
Institut Dolomieu, Université Joseph-
Fourier/Grenoble 1*

Etudes hydrologiques et hydrogéologiques

Pr. A. Monjoie
*Laboratoires de géologie de l'ingénieur,
d'hydrogéologie et de prospection
géophysique de la faculté des sciences
appliquées, Université de Liège*

Reconnaitances géologiques et géotechniques

J.-F. Hotellier
*Géotechnique appliquée P. et C.
Dériaz et Cie S.A., Carouge, Genève*

Traitement des bâtiments situés en Suisse et
aménagements paysagers de leurs abords pour
limiter leur impact visuel

**Cabinet d'architectes
H. Dessimoz**
Meyrin, Genève

Traitement des bâtiments situés en France
et aménagements paysagers de leurs abords pour
limiter leur impact visuel

**Cabinet d'architectes
R. Paucod**
Ferney-Voltaire

Mesures des niveaux sonores
autour de l'anneau du LEP

CETE APAVE Lyonnaise
Tassin

Aménagements paysager et hydraulique des zones de dépôt des déblais de Cessy et de Prévessin-Moëns	Bureau d'études V.R.D., cabinet J.-F. Roynette <i>(avec la collaboration de R. Paucod, architecte), Ferney-Voltaire</i>
Etude de l'impact économique régional du CERN en Rhône-Alpes et dans les cantons de Genève et de Vaud	Pr. J.-P. Claveranne <i>(sous la direction de) – Laboratoire GRAPHOS – CNRS Université Jean-Moulin/Lyon 2</i>
Sites de dépôt des déblais : rapport d'expertise floristique	Dr. J. Corcelle <i>Association pour la connaissance de la flore du Jura, Thoiry</i>
Eaux de drainage des puits d'accès : qualité des eaux et impact des rejets sur les cours d'eau récepteurs	C. Meisser ECOTEC Environnement S.A. <i>Genève</i>
Sites de dépôt des déblais : rapport d'expertise faunistique	MM. F. Corcelle et J. Prost <i>Lieutenants de louveterie assermentés, secteurs Ferney-Thoiry et Pays de Gex- -Nord</i>
Données de l'Aéroport International de Genève : fréquentation globale et mouvements pour les différents couloirs aériens	Aéroport International de Genève <i>Service environnement</i>

Crédits photographiques

Page	Nom de l'image	Copyright
1ère de couverture	Vue aérienne de la zone du LHC	SWISSAIR
4ème de couverture	Vue aérienne rapprochée de la zone du LHC	SWISSAIR
9	Marie et Pierre Curie	Association Curie et Joliot-Curie
10	Albert Einstein	Keystone Press Archive
11	Le modèle standard	d'après Times Magazine
18	Simulation de la détection d'une paire quark-antiquark dans le LHC	A. Rubbia, T. Sjostrand
212	Orchis pyramidal	A. Van Praag
212	Gentiane jaune sur le Jura	J.-C. Freiss
213	Cephalantera longifolia (rare) et Solanum dulcamarum	A. Van Praag
214	Anémone sylvie	J.-C. Freiss
215	Grand tétras	Hansjörg Klein
215	Lapin dans la neige	Cantrall's Photos on Disc™
216	Chevreuil au printemps	A. Mabile – ECOTEC

Crédits

Page	Nom de l'image	Copyright
217	Asealaphe	J.-C. Freiss
218	Sanglier	A. Mabillet – ECOTEC
219	Canards colverts	M. Meylan

Table des matières

1	Les fondements scientifiques du projet LHC	1
1.1	Le CERN en bref	1
1.2	Le LHC, prochain maillon d'une chaîne d'accélérateurs	3
1.2.1	Le passé	3
1.2.2	Le présent	4
1.2.3	Et l'avenir ?	4
1.2.4	Le LHC est retenu	7
1.3	La physique des cent dernières années	8
1.3.1	Des changements spectaculaires	8
1.3.2	Les idées à l'épreuve de l'expérience	12
1.3.3	Le tableau est plus net, mais...	13
1.3.4	Vers l'origine de l'Univers	15
1.3.5	Le LHC : vers un nouveau paysage	17
2	Description du projet LHC : l'accélérateur	19

2.1	Les données de base du projet LHC	19
2.1.1	Réutilisation de l'infrastructure existante	21
2.1.2	Un puissant champ magnétique de guidage	21
2.1.3	Une utilisation extensive de la supraconductivité	23
2.1.4	Des collisions proton-proton mais aussi des collisions ion-ion et électron-proton	24
2.1.5	Un fonctionnement sûr et fiable	25
2.1.6	Les paramètres techniques du LHC	26
2.2	Les principaux éléments de l'accélérateur	28
2.2.1	Les injecteurs	28
2.2.2	La maille de la machine	30
2.2.3	Le guidage magnétique	32
2.2.3.1	<i>Les aimants de courbure</i>	32
2.2.3.2	<i>Les quadripôles de focalisation</i>	33
2.2.3.3	<i>Les autres aimants</i>	34
2.2.4	La cryogénie	35
2.2.5	Le vide	37
2.2.6	Le système d'accélération	39
2.2.7	Arrêt, extraction et absorption des faisceaux	40
2.2.8	L'alimentation électrique	42
2.2.9	Le refroidissement des éléments non-supraconducteurs	43
2.2.10	La ventilation du tunnel	44
2.2.11	Le pilotage de la machine	45
2.2.12	Le positionnement des éléments de la machine	46
2.2.12.1	<i>Géodésie de surface</i>	47
2.2.12.2	<i>Métrologie du collisionneur LHC</i>	47
2.3	Coût et planning	48
2.3.1	Coût du projet	48
2.3.2	Planning général prévisionnel	49

3 Description du projet LHC : les expériences 55

3.1	Programme initial et développements futurs	55
3.2	L'expérience ATLAS	57
3.2.1	L'appareillage scientifique	60
3.2.1.1	<i>Le trajectographe</i>	60
3.2.1.2	<i>Les calorimètres</i>	60
3.2.1.3	<i>Les trois calorimètres hadroniques à "tuiles"</i>	60
3.2.1.4	<i>Le calorimètre électromagnétique central</i>	60
3.2.1.5	<i>Les calorimètres combinés d'extrémité</i>	61
3.2.1.6	<i>Le spectromètre à muons</i>	61
3.2.2	Systèmes cryogéniques	62

3.3	L'expérience CMS	63
3.3.1	L'aimant supraconducteur	64
3.3.2	L'appareillage scientifique	65
3.3.2.1	<i>Le trajectographe</i>	65
3.3.2.2	<i>La calorimétrie électromagnétique et hadronique</i>	65
3.3.2.3	<i>Le détecteur à muons</i>	66
3.3.2.4	<i>L'acquisition des données</i>	66
3.3.2.5	<i>L'assemblage de CMS</i>	66
3.4	L'expérience ALICE	69
3.4.1	Programme de physique	69
3.4.2	Le détecteur	70
3.4.3	La collaboration à ALICE	70
3.5	L'expérience LHC-B	72
3.5.1	Le Spectromètre LHC-B	73
3.5.2	Adaptation de l'infrastructure existante	73
3.5.3	Aimant supraconducteur	74
3.5.4	Les différents détecteurs de particules et leurs éléments associés	74
3.6	Des collaborations mondiales	75
4	Ouvrages à réaliser	77
4.1	Les ouvrages souterrains	82
4.1.1	Les tunnels de transfert	83
4.1.1.1	<i>Tunnel de transfert TI 2</i>	83
4.1.1.2	<i>Tunnel de transfert TI 8</i>	85
4.1.2	Les absorbeurs de faisceaux au Point 6	88
4.1.2.1	<i>La branche nord-ouest des absorbeurs de faisceaux (en France)</i>	89
4.1.2.2	<i>La branche sud-est des absorbeurs de faisceaux (en Suisse)</i>	89
4.1.3	Les zones d'expérimentation	91
4.1.3.1	<i>Point 1 : zone d'expérimentation ATLAS</i>	91
4.1.3.2	<i>Zone d'expérimentation ALICE au Point 2</i>	94
4.1.3.3	<i>Zone d'expérimentation CMS au Point 5</i>	96
4.1.3.4	<i>Zone d'expérimentation LHC-B au Point 8</i>	99
4.1.4	Les autres modifications des ouvrages de l'accélérateur	101
4.1.4.1	<i>Chambres souterraines pour le passage des dipôles (UJ)</i>	101
4.1.4.2	<i>Elargissement du tunnel pour l'alimentation électrique (RZ)</i>	102
4.1.4.3	<i>Elargissements du tunnel pour les aimants de référence (RM)</i>	103
4.2	Les ouvrages de surface	103
4.2.1	Les ouvrages de surface au Point 1 à Meyrin (Suisse)	105
4.2.2	Les ouvrages de surface au Point 1.8 à Prévessin-Moëns	108
4.2.3	Les ouvrages de surface au PMI 2 sur le site de Meyrin	111
4.2.4	Les ouvrages de surface au Point 2 à Sergy	113
4.2.5	L'ouvrage de surface au Point 3.2 à Crozet	115

4.2.6	L'ouvrage de surface au Point 3.3 à Crozet	117
4.2.7	Les ouvrages de surface au Point 4 à Echenevex	119
4.2.8	Les ouvrages de surface au Point 5 à Cessy	121
4.2.9	Les ouvrages de surface au Point 6 à Versonnex	125
4.2.10	L'ouvrage de surface au Point 7.1 à Ornex	127
4.2.11	L'ouvrage de surface au Point 7.2 à Collex-Bossy en Suisse	129
4.2.12	Les ouvrages de surface au Point 8 à Ferney-Voltaire	130
4.3	Les nouvelles lignes électriques enterrées	132
4.3.1	Alimentation électrique du LHC	132
4.3.2	Cheminement des lignes électriques à réaliser	134
5	La conduite des travaux.....	135
5.1	Généralités	135
5.1.1	Découpage des travaux en lots	136
5.1.2	Coordination de la sécurité	136
5.1.3	Horaires de travail	137
5.1.4	Contraintes géologiques	138
5.1.5	Techniques de réalisation	140
5.1.5.1	<i>Congélation du sol</i>	140
5.1.5.2	<i>Paroi moulée</i>	142
5.1.5.3	<i>Emploi des explosifs</i>	143
5.1.5.4	<i>Autres méthodes d'exécution</i>	144
5.2	Travaux souterrains	145
5.2.1	Les puits d'accès	145
5.2.1.1	<i>Catégories</i>	145
5.2.1.2	<i>Techniques de réalisation</i>	145
5.2.2	Halles et chambres souterraines diverses	146
5.2.2.1	<i>Catégories</i>	146
5.2.2.2	<i>Techniques de réalisation</i>	146
5.2.3	Galeries souterraines	147
5.2.4	Tunnels de transfert et tunnels vers les absorbeurs de faisceaux	148
5.2.4.1	<i>Tunnels de transfert TI 2 et TI 8</i>	148
5.2.4.2	<i>Tunnels vers les absorbeurs de faisceaux</i>	150
5.2.5	Géotechnique des différents points	151
5.2.5.1	<i>Géotechnique du Point 1</i>	151
5.2.5.2	<i>Géotechnique pour le tunnel TI 2</i>	151
5.2.5.3	<i>Géotechnique du Point 2</i>	152
5.2.5.4	<i>Géotechnique du Point 5</i>	152
5.2.5.5	<i>Géotechnique du Point 6</i>	153
5.2.5.6	<i>Géotechnique du Point 7</i>	153
5.2.5.7	<i>Géotechnique pour le tunnel TI 8 et le puits PGC 8</i>	154
5.2.5.8	<i>Géotechnique du Point 8</i>	154
5.3	Conduite des travaux en surface	154

5.3.1	Les bâtiments	155
5.3.2	Les aires de stockage d'hélium	155
5.3.3	Voiries et réseaux divers	155
5.3.4	Espaces verts et clôturés	155
5.4	Les installations de chantiers	156
5.4.1	Généralités	156
5.4.2	Emplacements des chantiers pour chaque site	157
5.4.3	Hébergement du personnel pendant les chantiers	160
6	L'environnement dans son état initial	163
6.1	Géographie	163
6.2	Conditions climatiques	165
6.3	Géologie	168
6.3.1	Géologie générale	168
6.3.1.1	<i>Les formations quaternaires</i>	169
6.3.1.2	<i>La molasse tertiaire</i>	170
6.3.1.3	<i>Les formations du Jura</i>	171
6.3.2	Paléomorphologie	172
6.3.3	Les formations touchées par le projet	173
6.4	Séismicité	174
6.4.1	Généralités	175
6.4.2	Le tremblement de terre du 15 juillet 1996	176
6.5	Hydrogéologie	177
6.5.1	Hydrologie du site en général	177
6.5.2	Hydrologie autour des ouvrages du projet LHC	181
6.5.2.1	<i>Au Point 1</i>	181
6.5.2.2	<i>Pour le tunnel de transfert TI 2</i>	182
6.5.2.3	<i>Au Point 5</i>	183
6.5.2.4	<i>Au Point 6</i>	185
6.5.2.5	<i>Pour le tunnel de transfert TI 8</i>	186
6.6	Les eaux	186
6.6.1	Les études hydrologiques effectuées pour le projet LEP	186
6.6.2	Les ressources en eau dans le Pays de Gex	187
6.6.3	L'alimentation en eau du CERN	188
6.6.4	Les eaux rejetées	189
6.6.5	Contrôle de la qualité des rejets d'eaux	191
6.6.5.1	<i>Contrôles physico-chimique et chimique : eaux de réfrigération</i>	191
6.6.5.2	<i>Contrôles physico-chimique et chimique : eaux de drainage</i>	192
6.6.5.3	<i>Contrôle radiologique des eaux</i>	193

6.7	La qualité de l'air	194
6.7.1	Qualité de l'air rejeté par le système de ventilation	194
6.7.2	Qualité de l'air rejeté par les aéroréfrigérants	198
6.8	Etat radiologique initial	198
6.8.1	Les rayonnements ionisants	198
6.8.2	Les principales sources de rayonnements	199
6.8.2.1	<i>La radioactivité</i>	199
6.8.2.2	<i>Les rayonnements cosmiques</i>	199
6.8.2.3	<i>Les particules créées à des fins industrielles ou médicales</i>	200
6.8.3	Les normes de radioprotection	201
6.8.4	L'exposition moyenne en France	202
6.8.5	L'état radiologique initial pour le LHC	203
6.9	Etat chimique initial	206
6.10	Traitement des déchets	207
6.10.1	Les déchets ordinaires	207
6.10.2	Les déchets recyclés	207
6.10.3	Les déchets inertes	207
6.10.4	Les déchets des espaces verts	207
6.10.5	Les déchets industriels	207
6.10.6	Les déchets radioactifs	208
6.11	Le bruit	208
6.12	Les excavations et carrières du Pays de Gex	211
6.13	La flore	212
6.13.1	La flore du Pays de Gex	212
6.13.2	La flore dans les zones de travaux	213
6.14	La faune	214
6.14.1	La faune du Pays de Gex	214
6.14.2	La faune dans les zones de travaux	217
6.15	L'activité et l'occupation du sol	219
6.15.1	La population	219
6.15.2	Le logement	220
6.15.3	L'activité et l'emploi	220
6.15.3.1	<i>Population active</i>	220
6.15.3.2	<i>Activités économiques</i>	222
6.15.4	Poids économique du CERN	222
6.15.5	Tourisme	224
6.15.5.1	<i>L'occupation des sols</i>	225
6.15.5.2	<i>Réseau routier et trafic</i>	227
6.15.5.3	<i>Transports publics</i>	227
6.15.5.4	<i>Transports ferroviaires</i>	228
6.15.5.5	<i>Transports aériens</i>	229
6.15.6	Agriculture et sylviculture	229

6.15.7 Pêche et pisciculture	230
6.16 Patrimoine	231
6.16.1 Patrimoine naturel et architectural	232
6.16.2 Patrimoine archéologique	232
7 Effets du LHC sur l'environnement	235
7.1 Raisons et conséquences du choix du LHC	236
7.2 Méthodologie pour l'évaluation des impacts	236
7.2.1 Priorité à la concertation	236
7.2.2 Méthodes d'analyse des impacts	237
7.2.2.1 Impact radiologique	237
7.2.2.2 Impact sur les ressources en eau	237
7.2.2.3 Impact sur les rejets d'eau et d'air	238
7.2.2.4 Impact sur les niveaux sonores	238
7.2.2.5 Impact visuel	238
7.2.2.6 Impact sur le trafic routier	238
7.2.2.7 Impact sur la faune et la flore	239
7.2.3 Difficultés rencontrées	239
7.3 Phase de construction : les chantiers	240
7.3.1 Les chantiers souterrains	240
7.3.2 Les chantiers de surface	240
7.4 Phase d'exploitation : les ouvrages terminés	241
7.4.1 Les ouvrages souterrains	241
7.4.2 Les ouvrages de surface	241
7.5 Impact visuel	242
7.5.1 Aspect visuel des ouvrages de surface	242
7.5.1.1 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 1.8 (Prévessin-Moëns)	243
7.5.1.2 Aspect visuel des nouvelles constructions pour le PMI 2	245
7.5.1.3 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 2 (Sergy)	246
7.5.1.4 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 3.2 (Crozet)	246
7.5.1.5 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 3.3 (Crozet)	247
7.5.1.6 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 4 (Echenevex)	248
7.5.1.7 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 5 (Cessy)	249
7.5.1.8 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 6 (Vernonnex)	253
7.5.1.9 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 7.1 (Ornèxe)	254
7.5.1.10 Aspect visuel du Point 7.2 (Collex-Bossy)	254
7.5.1.11 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 8 (Fereny-Voltaire)	255
7.5.1.12 Aspect visuel des nouvelles constructions au Point 1 (Meyrin)	256
7.5.2 Les nouvelles lignes électriques	257
7.5.3 Les chantiers annexes	257
7.6 Impact radiologique	258

7.6.1	Les sources de rayonnements ionisants	258
7.6.2	Les normes de radioprotection	259
7.6.3	Les mesures de protection	261
7.6.4	Les rejets atmosphériques liés à la ventilation	261
7.6.5	Rejets atmosphériques radiologiques liés aux aéroréfrigérants (vapeur d'eau)	262
7.6.6	Rejets d'air et normes radiologiques	262
7.6.7	Les eaux souterraines	263
7.6.8	Rejets d'eau de refroidissement de la machine	264
7.6.9	Rejets d'eau brute	265
7.6.10	Rejets d'eau de drainage	265
7.6.11	Rejets d'eau et normes radiologiques	266
7.6.12	Résumé	267
7.7	Déblais	267
7.7.1	Généralités	267
7.7.2	Les déblais	268
7.7.2.1	<i>Description point par point</i>	268
7.7.2.2	<i>Les zones de dépôt des déblais</i>	269
7.8	Déchets	272
7.8.1	Les bétons	272
7.8.1.1	<i>Volume et lieu d'extraction</i>	272
7.8.1.2	<i>Procédé de recyclage</i>	272
7.8.1.3	<i>Les bétons activés</i>	273
7.8.2	La bentonite	273
7.8.3	Autres déchets de chantier	273
7.8.4	Déchets produits en période d'exploitation	274
7.8.5	Déchets radioactifs et démantèlement	274
7.9	Effets sur les ressources en eau	274
7.9.1	Consommation d'eau	274
7.9.2	Impact des travaux sur les nappes aquifères	274
7.9.3	Rivières, pêche et pisciculture	275
7.10	Le bruit et les ébranlements	276
7.10.1	Les bruits liés aux chantiers	276
7.10.2	Les ébranlements (tirs de mines)	277
7.10.3	Le LHC en fonctionnement	277
7.11	Transport, circulation et voirie	277
7.11.1	Généralités	277
7.11.2	Nouveaux aménagements routiers	278
7.11.2.1	<i>Sortie ouest du site de Meyrin du CERN (Saint Genis-Pouilly)</i>	278
7.11.2.2	<i>Carrefour VC 5/RD 984 (Prévessin-Moëns)</i>	279
7.11.2.3	<i>Aménagement de la RD 15g à la sortie du Point 5 à Cessy</i>	280
7.11.3	Le trafic induit	280
7.11.3.1	<i>Trafic induit par le démontage du LEP</i>	281
7.11.3.2	<i>Trafic induit par les chantiers de génie civil</i>	281

7.11.3.3	Trafic induit par l'installation des expériences	283
7.11.3.4	Trafic induit par l'installation de l'accélérateur	285
7.11.3.5	Trafic durant l'exploitation	285
7.11.3.6	Evolution du trafic global dans le temps	285
7.11.3.7	Impact environnemental des transports	288
7.12	Consommation électrique	288
7.13	Impact foncier	290
7.13.1	Impact foncier en France	290
7.13.1.1	Terrains à acquérir en surface	290
7.13.1.2	Terrains à acquérir en tréfonds	290
7.13.1.3	Servitudes	291
7.13.1.4	Occupations temporaires	291
7.13.2	Impact foncier en Suisse	292
7.14	Effets sur la faune et la flore	292
7.15	Effets sur la sécurité	293
7.16	Impact socio-économique	294
7.16.1	Evolution des activités du CERN hors LHC de 1996 à 2005	294
7.16.2	Effectifs des entreprises contractantes pendant la construction et l'installation du LHC	295
7.16.3	Evolution globale des effectifs industriels	297
7.16.3.1	Répartition socio-professionnelle et besoins en logement	299
7.16.3.2	Scolarité	300
7.16.4	Personnel titulaire et utilisateurs en phase d'exploitation	301
7.16.5	Effets d'entraînement économique	301
8	Mesures pour éviter, réduire ou compenser les effets sur l'environnement	303
8.1	Les bâtiments et leurs abords	304
8.1.1	Situation et orientation des bâtiments	304
8.1.2	La forme et la volumétrie des constructions	305
8.1.3	Les matériaux de façade	305
8.1.4	La couleur	306
8.1.5	Les mouvements de terrain et les plantations	306
8.2	Les réseaux	307
8.3	Les zones de dépôt des déblais	307
8.3.1	Dépôt des déblais à Prévessin-Moëns	308
8.3.2	Dépôt des déblais au Point 5 à Cessy	310
8.4	Protection de la faune et de la flore	313
8.5	Protection contre les nuisances sonores	315

8.5.1	Pendant le chantier	315
8.5.2	Ouvrages en fonctionnement	316
8.6	Les aménagements de voirie	316
8.7	Protection des ressources en eau	317
8.7.1	Etudes hydrologiques	317
8.7.2	Précautions prises pendant l'exécution des travaux	317
8.7.3	Contrôles physico-chimiques des rejets d'eau	317
8.8	Mesures d'économie d'énergie	318
8.8.1	Accélérateurs	318
8.8.2	Supraconductivité	320
8.8.3	Conditionnement d'air et ventilation	320
8.8.4	Pompes et distribution de l'eau de refroidissement	320
8.8.5	Eclairage	320
8.8.6	Services généraux	320
8.8.7	Mesures d'économie d'énergie pour le collisionneur LHC	321
8.9	Mesures de contrôle	322
8.9.1	Principes de protection et de contrôle radiologiques	322
8.9.2	Contrôle radiologique des rejets d'eau	322
8.9.3	Contrôle radiologique des rejets d'air	323
8.9.4	Contrôle des rejets atmosphériques	323
8.9.5	Mesures de propreté liées aux chantiers et transports	323
8.10	Conséquences d'un séisme	324
8.11	Coûts des mesures pour réduire les effets sur l'environnement	325
Liste des annexes techniques		329
Glossaire		331
Unités de mesure		337
Liste des illustrations		339
Liste des tableaux.		345
Contributions extérieures		347
Crédits photographiques		349

